

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Neville Marcelo Barbosa Fusco

**AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA APLICAÇÃO A
SISTEMAS DE GARANTIA METROLÓGICA DE
LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO**

Florianópolis

2014

Neville Marcelo Barbosa Fusco

**AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA APLICAÇÃO A
SISTEMAS DE GARANTIA METROLÓGICA DE
LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO**

Dissertação submetida ao PosMEC -
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, área de
concentração: Metrologia e
Instrumentação, da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de mestre em
engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Marco Antonio
Martins Cavaco, Ph. D.

Florianópolis

2014

Neville Marcelo Barbosa Fusco

**AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA APLICAÇÃO A SISTEMA
DE GARANTIA METROLÓGICA DE LABORATÓRIOS DE
CALIBRAÇÃO E ENSAIOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração: Metrologia e Instrumentação.

Local, 29 de abril de 2014

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng
Coordenador do curso

Banca Examinadora:

Professor Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Professor Tiago L. F. Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Professor Mauricio de Campos Porath, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

A minha mãe, Maria Rita Barbosa.
A meu pai, José Waldomiro Fusco.
A minha esposa, Clarisse Pereira
Nunes.

AGRADECIMENTOS

Aos professores e orientadores Marco Antônio Martins Cavaco e Carlos Alberto Flesch, pela orientação, paciência e compreensão nos momentos de dificuldade. Também pela confiança na dedicação do tema e por acreditar na minha capacidade no desenvolvimento do trabalho.

A minha família, em especial a minha mãe pela dedicação e luta em todos esses anos de estudos e trabalho, me apoiando e incentivando nos momentos mais difíceis.

Ao professor Gustavo Daniel Donatelli pelo incentivo e auxílio no entendimento do método de Monte Carlo. Pelo suporte e palavras de motivação em um momento muito difícil da minha vida profissional.

Aos amigos e companheiros de estudos no programa de Pós-Graduação: Alexandre, André, Juliana, Fernando, Oscar, Tobias, Diogo, Mariah, Leonardo, Jefferson, Pedro e Moacir.

Aos demais professores e profissionais do LABMETRO pela convivência sempre muito agradável, em especial à Rosana Vieira pela paciência, respeito e amizade.

A minha esposa Clarisse Pereira Nunes e sua família, que estiveram sempre ao meu lado como minha própria família. Vocês tornaram a distância de casa muito mais fácil de suportar.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

(Leonardo Da Vinci)

RESUMO

A avaliação das incertezas de medições é imprescindível para garantir a confiabilidade metrológica e atender aos requisitos nas normas de sistema de gestão da qualidade. Atualmente grande parte do estudo da metrologia é dedicada à avaliação e minimização de incertezas de medições.

Para atender aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, os laboratórios de calibração devem estimar a incerteza de medição de todas as calibrações. Na estimativa da incerteza de medição, todos os componentes de incerteza que sejam conhecidos devem ser considerados.

Com a diversidade de métodos de calibração, padrões e dispositivos auxiliares disponíveis no mercado, a seleção do processo de calibração mais adequado e a avaliação da inerente incerteza não são tarefas simples para um laboratório de calibração. É necessário a análise de um grande número de informações técnicas e conhecimento em diferentes áreas da metrologia e da instrumentação.

A definição de um modelo de medição, a modelagem do processo de medição e a definição de uma equação de medição geralmente são as tarefas de maior dificuldade na avaliação da incerteza de medição.

O uso de uma ferramenta adequada de simulação de incerteza de medição de processos de calibração pode facilitar sobremaneira a avaliação de incerteza em um laboratório de calibração.

Com tal objetivo foi estruturado e desenvolvido neste trabalho um ambiente de simulação de incerteza de medição em processos de calibração através do método de simulação de Monte Carlo. Um banco de dados foi desenvolvido possibilitando o cadastro das informações de diferentes processos de calibração e a comparação de seus resultados.

Uma simulação foi realizada utilizando dados reais de um laboratório de calibração que serviu como estudo de caso. Os resultados obtidos mostraram consistência com os valores praticados pelo laboratório. Os resultados obtidos também permitiram comprovar a funcionalidade e aplicabilidade do ambiente de simulação de incerteza de medição em processos de calibração.

ABSTRACT

The evaluation of the uncertainty of measurement is essential to ensure the metrological confirmation and to attend the requirements of quality management system standards. Currently much of the metrology's study is dedicated to evaluating and minimizing the uncertainty of measurements.

To attend the requirements of ISO/IEC 17025, the calibration laboratories must estimate the uncertainty of measurement of all calibrations. In the evaluation of the uncertainty of measurement all the known components must be considerate.

With the variety of calibration methods, standards and auxiliary devices available in the market, the task of selecting the most appropriate process of calibration and the evaluation of the inherent uncertainty are not simple tasks for a calibration laboratory. It is necessary to analyze a lot of technical information and knowledge in different area of metrology and instrumentation.

The definition of measurement model, modeling of measurement process and definition of the measurement equation usually are most difficult tasks in the evaluation of measurement uncertainty.

The use of an appropriate tool for simulate the measurement uncertainty in calibration process can facilitate the evaluation of measurement uncertainty in a calibration laboratory.

For this purpose was structured and developed in this work a simulation environment of measurement uncertainty in calibration process using the Monte Carlo's simulation technique. A database was developed allowing the registration of information from different calibration processes and the comparison of their results.

A simulation was realized using real data from a calibration laboratory that was used as a case study. The results showed consistency with the used values in the calibration laboratory. The results also allowed confirming the functionality and applicability of the simulation environment of measurement uncertainty in calibration process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos do processo de medição.....	10
Figura 2 - Calibração direta de um sistema de medição.....	19
Figura 3 - Calibração indireta de um sistema de medição.....	20
Figura 4 - Determinação do resultado de uma medição usando o GUM.....	26
Figura 5 - Ilustração da propagação de distribuições.....	27
Figura 6 - Fluxograma da avaliação de incerteza de medição usando SMC.....	28
Figura 7 - Distribuições empíricas obtidas por geração de números aleatórios com distribuição N (10;1), para distintos tamanhos de amostras.....	29
Figura 8 - Modelo genérico de cadeia de medição.....	32
Figura 9 - Erro de linearidade linear pelo MMQ.....	34
Figura 10 – Sensibilidade de um sistema de medição	35
Figura 11 – Erro máximo de um sistema de medição.....	38
Figura 12 - Tela inicial do ambiente de simulação.....	45
Figura 13 – Estrutura do ambiente e fluxo de informações.....	47
Figura 14 - Tela de cadastro de classes de sistemas de medição.....	48
Figura 15 - Tela de cadastro de sistemas de medição.....	49
Figura 16 - Tela de cadastro de modelos de cadeias de medição.....	50
Figura 17 - Tela de simulações e resultados.....	52
Figura 18 - Estrutura do banco de dados.....	53
Figura 19 - LABVIEW <i>Database Connectivity Toolse</i>	58
Figura 20 - Distribuição de Probabilidade para a equação $Y = X_1 + X_2$, conforme	60
Figura 21 - Distribuição de Probabilidade para a equação $Y = X_1 + X_2$, obtida no ambiente.....	60
Figura 22 - Gráfico do número de iterações x desvio padrão dos resultados simulados.....	62
Figura 23 - Modelo de calibração de um termômetro digital.....	64
Figura 24 - Cadeia de medição para o processo de calibração proposto.....	65
Figura 25 - Modelo de cadeia de medição cadastrado.....	74
Figura 26 - Gráfico da variação da média, desvio padrão, limite superior e inferior do IA para diferentes valores de M	76
Figura 27 - Resultados obtidos para o processo de calibração proposto.....	77
Figura 28 – Planilha de incerteza em acordo com o ISO GUM.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens entre métodos de avaliação de incerteza de medição.....	30
Tabela 2 - Resultados de simulação obtidos para diferentes valores de M , para a função $Y = X_1 + X_2$	59
Tabela 3 - Resultados de 10 simulações obtidos para diferentes valores de M , para a função $Y = X_1 + X_2$	59
Tabela 4 - Classes de tolerância para termorresistores.....	64
Tabela 5 - Derivas com o tempo encontrados em termorresistores de platina.....	67
Tabela 6 – Análise da variação de M nos resultados simulados.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Registrada
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
RBC	Rede Brasileira de Calibração
RBLE	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
SMC	Simulação de Monte Carlo
VI	<i>Virtual Instrument</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
UTS	Unidade de Tratamento de Sinais
GUM	Guia para Expressão da Incerteza de Medição
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas
JCGM	<i>Join Committee for Guides in Metrology</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
LABVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
API	<i>Application-Programming Interface</i>
ODBC	<i>Open Database Connectivity</i>
VMC	Tensão de Modo Comum
RRMC	Razão de Rejeição de Modo Comum
RDBMS	<i>Relational Database Management System</i>
ITS	<i>International Temperature Scale</i>
MMQ	Método dos mínimos quadrados
CGCRE	Coordenação Geral de Acreditação
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	9
1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.3 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO	15
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	18
2.1 CALIBRAÇÃO.....	18
2.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	20
2.2.1 Método clássico do GUM.....	23
2.2.2 Método de simulação de Monte Carlo (SMC)	26
3 PARAMETROS CARACTERÍSTICOS DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO, PADRÕES E DISPOSITIVOS AUXILIARES.....	31
3.1.1 Resolução	33
3.1.2 Erro de linearidade	33
3.1.3 Sensibilidade	34
3.1.4 Erro de histerese.....	35
3.1.5 Estabilidade e Deriva	35
3.1.6 Precisão 36	
3.1.7 Repetibilidade.....	Erro! Indicador não definido.
3.1.8 Reprodutibilidade	36
3.1.9 Tendência.....	37
3.1.10 Erro máximo.....	37
3.2 ESPECIFICAÇÕES DE FABRICANTES.....	38
3.2.1 Valores típicos ou nominais.....	39
3.2.2 Limites de máximo ou mínimo.....	39
3.2.3 Valores: Mínimo, Típico e Máximo.	40
3.2.4 Valores: Mínimo e Típico ou Típico e Máximo	40
3.2.5 Valores: Mínimo e Máximo.....	40
3.2.6 Valor: Típico.....	41
3.2.7 Valor: Mínimo ou Máximo.....	41
4 ESTRUTURA DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO	42
4.1 ANÁLISE E REQUISITOS DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.	44
4.2 ESTRUTURA DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	46
4.2.1 Cadastro de classe de sistemas de medição.....	47
4.2.2 Cadastro de sistemas de medição.....	48
4.2.3 Cadastro de modelos de cadeias de medição.....	49
4.2.4 Resultados da simulação de um processo de calibração	50

5 DESENVOLVIMENTO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.....	54
5.1 PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	54
5.2 RECURSOS DE SOFTWARE	55
5.2.1 LABVIEW.....	55
5.2.2 Servidor de dados MySQL	56
5.2.3 MySQL Connector/ODBC	57
5.2.4 Database Connectivity Toolset	57
6 AVALIAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	59
6.1 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	59
6.2 SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO DE CALIBRAÇÃO	62
6.2.1 Análise do processo de calibração.....	63
6.2.2 Resultados do processo de calibração.....	73
7 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS..	79
7.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS.....	79
7.2 ADEQUAÇÃO DAS TECNOLOGIAS	80
7.3 POSSIBILIDADE DE TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No contexto atual de um mundo globalizado, a sobrevivência das empresas está diretamente ligada com sua capacidade de gestão, qualidade, produtividade e inovação de seus produtos e processos. A busca pela melhoria contínua de produtos e processos é uma obrigação.

O desenvolvimento e a consolidação da cultura metrológica vêm-se constituindo em uma estratégia permanente das organizações, uma vez que resulta em ganhos de produtividade, qualidade dos produtos e serviços, redução de custos e eliminação de desperdícios. As medições estão presentes direta ou indiretamente em todos os processos de tomada de decisão, envolvendo comércio, indústria, saúde e meio ambiente [Pizzolato, 2004].

A metrologia é definida como a ciência da medição e suas aplicações. A metrologia engloba todos os aspectos práticos e teóricos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação [VIM, 2012].

O Vocabulário Internacional de Metrologia, conhecido como VIM, é o documento que define os principais conceitos e termos utilizados na metrologia. Ele define o conceito “medição” como um processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza [VIM, 2012].

Embora o VIM seja o principal documento em relação às definições e conceitos utilizados na metrologia, existem outras normas que também apresentam conceitos relacionados, tais como as normas da série ISO9000. A norma ABNT NBR ISO9000: 2005 – Sistemas de Gestão da Qualidade – Fundamentos e Vocabulário apresenta o termo processo de medição. Um conjunto de ações necessárias para determinar o valor de uma grandeza ou um mensurando representa o processo de medição. Neste trabalho os termos “medição” e “processo de medição” são considerados como equivalentes.

Uma medição ou um processo de medição tem como objetivo determinar o valor do mensurando, isto é, o valor da grandeza específica submetido à medição. Uma medição começa, portanto, com uma especificação apropriada do mensurando, do método de medição e do procedimento de medição [INMETRO, 2012]. O processo de medição apresenta como saída o resultado de medição. A figura 1 apresenta os elementos que compõem um processo de medição.

O resultado de medição é representado pelo conjunto de valores que representam a grandeza medida, incluindo toda informação pertinente disponível. Geralmente, o resultado da medição é expresso por um único valor medido e uma incerteza de medição associada [VIM, 2012].

Quando se relata o resultado de medição é mandatório apresentar alguma indicação da qualidade desse resultado, possibilitando a avaliação da sua confiabilidade e a comparação entre eles ou com valores de uma especificação. O resultado de uma medição somente pode ser considerado completo quando ele informa o valor atribuído ao mensurando e sua incerteza de medição associada [INMETRO, 2012].

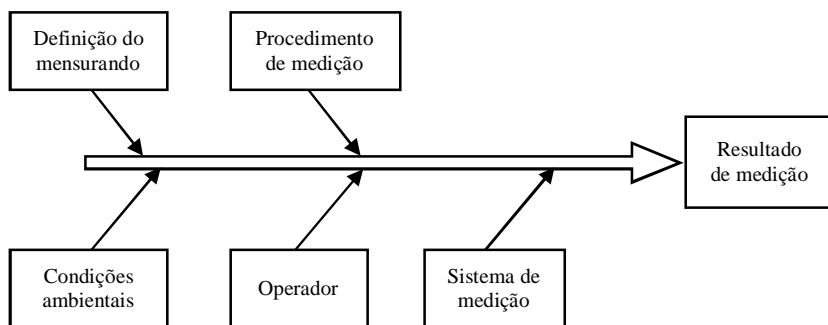


Figura 1 – Elementos do processo de medição

Fonte: Albertazzi, 2008

O sistema de medição é um dos elementos mais importante de um processo de medição. É o meio através do qual as medições são efetuadas [Albertazzi, 2008]. Um sistema de medição também é um instrumento de medição, ou um conjunto de instrumentos de medição. Usualmente estes instrumentos estão ligados a outros dispositivos para a realização da medição. Em medições analíticas, algumas vezes, é necessário o uso de reagentes e insumos para a obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas específicas [VIM, 2012].

Um sistema de medição ou instrumento de medição é um dispositivo utilizado para realizar medições. Esse sistema de medição pode utilizado de forma individual ou associado a um ou mais dispositivos suplementares [VIM, 2012].

O termo equipamento de medição possui uma definição mais abrangente e genérica. O equipamento de medição é um instrumento de

medição, um programa de computador, um padrão de medição, um material de referência ou dispositivos auxiliares, ou uma combinação deles, necessários para executar um processo de medição [ABNT NBR ISO9000, 2005].

Embora os termos instrumentos de medição, sistema de medição e equipamento de medição sejam equivalentes, a expressão sistema de medição tem sido preferida para descrever, de forma mais geral, qualquer meio de medição, incluindo desde instrumentos de medição mais simples àqueles compostos por vários módulos interligados. Neste trabalho será adotado o termo sistema de medição.

Os sistemas de medição sempre apresentam erros de medição. Esses erros de medição podem ser caracterizados em erros sistemáticos e aleatórios. Existe uma tendência de sistemas de medição degradar seu desempenho ao longo do tempo. A plena caracterização dos erros sistemáticos e aleatórios, apresentados nas condições que o sistema de medição é utilizado, é uma condição necessária para que resultados de medições confiáveis sejam obtidos.

A forma usual de caracterizar o desempenho metrológico de um sistema de medição é a calibração. Através da calibração é possível verificar de maneira efetiva como os valores indicados pelo sistema de medição se relacionam com os valores do mensurando [Albertazzi, 2008].

Através do procedimento experimental denominado de calibração é possível correlacionar os valores indicados pelo sistema de medição e sua correspondência com a grandeza sendo medida. Durante uma calibração diversas medições são realizadas com o objetivo de caracterizar o desempenho metrológico do sistema de medição [Albertazzi, 2008]. Como exemplo, através de uma calibração é possível estabelecer:

- a relação entre a temperatura e tensão termoeletrônica de um termopar e sua respectiva incerteza de medição associada à relação;
- uma estimativa dos erros sistemáticos de um manômetro e sua respectiva incerteza de medição associada à estimativa;
- o valor efetivo de uma massa padrão e sua respectiva incerteza de medição associada ao valor efetivo.

Diversas normas de garantia da qualidade trazem recomendações e definem requisitos para verificar a confiabilidade metrológica de sistemas de medição. A norma ABNT NBR ISO 9001:2008 – Sistema

de Gestão da Qualidade define em seu requisito 7.6 a necessidade de realizar a calibração ou a verificação de um sistema de medição sempre que existir a necessidade de assegurar a validade dos resultados. A calibração ou verificação deve ser realizada antes do uso ou em intervalos especificados. Também é necessária a utilização de padrões de medição rastreáveis a padrões de medição internacionais ou nacionais.

A norma ABNT NBR ISO 10012:2004 – Sistema de Gestão da Medição apresenta a necessidade de realizar a comprovação metrológica. A comprovação metrológica representa um conjunto de ações para garantir a confiabilidade das medições, isto é, assegurar que o sistema de medição atende aos requisitos para o uso pretendido. A comprovação metrológica compreende a realização da calibração e verificação do sistema de medição, e a comparação dos resultados obtidos contra requisitos predefinidos em acordo com a necessidade do produto ou processo.

O resultado de uma calibração permite o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinação das correções a serem aplicadas. A calibração também pode determinar outras propriedades metrológicas como, por exemplo, efeitos de grandezas de influência sobre a indicação do sistema de medição, ou o comportamento metrológico do sistema de medição em condições adversas de utilização.

Em função dos resultados obtidos em uma calibração ou verificação, o desempenho metrológico do sistema de medição pode ser comparado com especificações de uma norma técnica, regulamento técnico ou outro requisito, e um parecer de conformidade pode ser obtido [Albertazzi, 2008].

Os resultados de uma calibração são apresentados em um documento denominado “certificado de calibração”. O certificado de calibração apresenta diversas informações sobre o desempenho metrológico do sistema de medição. Frequentemente, como principal resultado, um certificado de calibração apresenta uma tabela, ou gráfico, com as informações, para cada ponto ao longo da faixa de medição, das estimativas do erro sistemático ou da correção a ser aplicada e sua respectiva incerteza de medição associada.

Normalmente as calibrações são realizadas em ambiente de laboratório onde as condições são controladas. A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005-Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração define os requisitos que um

laboratório deve atender para garantir a qualidade dos resultados das calibrações e ensaios que realiza.

Um laboratório pertencente ou postulante à Rede Brasileira de Calibração (RBC/CGCRE) ou a Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE/CGCRE) deve atender a todos os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2005, bem como aos requisitos necessários para a acreditação definidos pela Coordenação Geral de Acreditação (CGCRE/INMETRO) em seus documentos normativos e orientativos.

1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente grande parte do estudo da metrologia é dedicada à avaliação e à minimização de incertezas. Quando integrante dos sistemas da qualidade industrial e fundamental para a melhoria de produtos e processos, a metrologia precisa ser tratada como uma atividade da cadeia produtiva, sendo gerenciada nos mesmos moldes dos demais elementos que compõe a produção.

Para se garantir a qualidade metrológica de um sistema de qualidade industrial é necessário que se trate o problema de forma global, abrangendo instrumentação, procedimentos de medição e ações de gerenciamento da qualidade. Garantir a qualidade metrológica passa obrigatoriamente pela avaliação da incerteza de medição. Tal avaliação precisa ser formal, seguindo métodos consistentes e internacionalmente reconhecidos [FLESCHE, 2001].

A validade dos resultados de medição é altamente dependente das propriedades metrológicas do sistema de medição, determinadas pela sua calibração. O intervalo de valores atribuídos ao mensurando é o intervalo de valores de padrões que teriam fornecido as mesmas indicações [VIM, 2012].

Os laboratórios de calibração avaliam a incerteza de medição de todos os processos de calibração que realizam para a definição de seu escopo de serviço. O escopo de um laboratório deve informar a faixa de calibração e a capacidade de medição e calibração (CMC) que o laboratório é capaz de realizar em uma calibração rotineira.

A norma NIT – DICLA – 021 – Expressão da incerteza de medição por laboratórios de calibração é um documento orientativo elaborado pela Divisão de Acreditação de Laboratórios (Dicla) do INMETRO que define o termo “capacidade de medição e calibração” como menor incerteza de medição que um laboratório pode obter quando realiza calibrações ou medições dentro do escopo de sua acreditação.

Para realizar uma avaliação da incerteza de medição associada com o valor de mensurando é fundamental definir um modelo de medição, isto é, uma equação de medição que reflete a relação das grandezas de influência com o mensurando, bem como conhecimento sobre os valores dessas grandezas. Somente com a definição de um modelo de medição é possível identificar as grandezas de influências e as fontes de incertezas envolvidas.

Geralmente o conhecimento sobre as grandezas de influências é incompleto e, portanto, em acordo com a teoria Bayesiana de probabilidade, deve ser expresso por uma função densidade de probabilidade com base no princípio da máxima entropia da informação [Somer, 2006].

A definição de um modelo de medição não é uma tarefa simples. Geralmente, a modelagem do processo de medição e a definição de uma equação de medição são as tarefas de maior dificuldade na avaliação da incerteza de medição. A definição de um modelo de medição serve para avaliar o sistema de medição original e obter conclusões de seu comportamento [Somer, 2006].

O panorama tecnológico atual é marcado pela existência de uma grande diversidade de sistemas de medição. Para um mesmo mensurando, é possível encontrar no mercado vários sistemas de medição com diferentes princípios de operação, diferentes níveis de incerteza, diferentes grau de automatização, robustez etc., com expressivas diferenças em relação ao custo inicial e ao custo operacional [Albertazzi, 2008].

Ao definir um método de medição, uma equação de medição e modelar o processo de medição mais adequado ao seu escopo de serviço, o laboratório de calibração deve considerar pelo menos:

- diferentes cadeias de medição que podem ser geradas a partir da justaposição de diferentes sistemas de medição;
- diferentes métodos de calibração;
- diferentes pontos de medição ao longo da faixa de medição do sistema de medição em calibração;
- diferentes sistemas de medição padrão para um determinado método de calibração.

O emprego de um ambiente de simulação de incerteza de medição adequado às necessidades de um laboratório de calibração pode contribuir de forma significativa na seleção adequada de um processo de

medição e na definição de uma equação de medição. Também pode facilitar de sobremaneira a comparação entre diferentes métodos de medição, padrões, equações de medição, etc., para um mesmo tipo de calibração.

1.3 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo geral consiste em desenvolver um ambiente de simulação da incerteza de medição associada a um resultado de uma calibração, através das informações de padrões e dispositivos auxiliares envolvidos em uma calibração e da definição de uma equação de medição pelo usuário.

Os resultados da simulação do processo de calibração são obtidos através do método de simulação de Monte Carlo (SMC). São apresentados como resultados os valores estimados da característica metrológica avaliada e sua respectiva incerteza de medição associada. Como exemplo, no caso de uma calibração avaliar a estimativa do erro sistemático, ou tendência, de um medidor de pressão digital, o resultado obtido no ambiente de simulação será uma estimativa da tendência e a incerteza de medição associada a essa tendência.

Apresentado ao objetivo geral citado acima, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- estudar os métodos de avaliação da incerteza de medição utilizados por laboratórios de calibração;
- realizar uma comparação do método de propagação de incerteza e o método de propagação de distribuições para avaliação da incerteza;
- desenvolver uma base de dados de padrões e dispositivos auxiliares utilizados em calibrações;
- apresentar as informações obtidas da simulação de Monte Carlo da equação de medição;
- realizar um estudo de caso através da simulação de um processo de calibração utilizando as informações fornecidas por um laboratório;
- auxiliar na definição de uma equação de medição pelo usuário do ambiente.

O ambiente de simulação possibilita a avaliação de processos de calibração de sistemas de medição pelo método direto e indireto. Pode ser utilizado principalmente na simulação de processos de calibração de

sistemas de medição de grandezas mecânicas e elétricas com mensurando invariável.

São exemplos de simulações de processos de calibração que podem ser realizada no ambiente: calibração de termopares e termorresistência, calibração de manômetros, calibração de indicadores/controladores de temperatura, calibração de torquímetros, etc.

O ambiente proposto neste trabalho possibilita que um laboratório de calibração concentre as informações técnicas de seus padrões e dispositivos auxiliares em um só lugar. Com essas informações o usuário pode cadastrar diferentes processos de calibração, com diversas equações de medição, padrões e dispositivos auxiliares. O ambiente permite que o laboratório defina a equação de medição e auxilia na seleção do processo de calibração mais adequado ao seu escopo, bem como na determinação de sua capacidade de medição e calibração.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O documento foi estruturado em 7 capítulos, que foram elaborados de forma a facilitar o entendimento e a lógica para o desenvolvimento e aplicação do ambiente de simulação.

No capítulo 2 são apresentados os principais conceitos e definições sobre a incerteza de medição em calibração. São apresentadas informações sobre os métodos de cálculo de incerteza de medição baseados no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) e na simulação de Monte Carlo.

No capítulo 3 são apresentadas informações sobre as características metrológicas e especificações dos fabricantes de sistemas de medição, padrões e dispositivos auxiliares utilizados em processos de calibração.

No capítulo 4 é apresentada a estrutura do ambiente de simulação desenvolvido, bem como as telas principais utilizadas para cadastro das informações e obtenção dos resultados.

No capítulo 5 é apresentado o processo para o desenvolvimento do ambiente de simulação e as tecnologias e métodos utilizados. Uma justificativa para a seleção do método de simulação de Monte Carlo é apresentada nesse capítulo.

No capítulo 6 é realizada a avaliação do ambiente de simulação. Uma avaliação da influência do método de Monte Carlo sobre o resultado é apresentada. É avaliada a aplicabilidade do ambiente, através da simulação de um processo de calibração da grandeza temperatura.

O capítulo 7 apresenta uma conclusão sobre o ambiente de simulação, suas limitações e possíveis melhorias, bem como propostas para trabalhos futuros em linhas de pesquisas semelhantes.

2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO

2.1 CALIBRAÇÃO

A calibração é uma comparação entre a indicação de um sistema de medição e um valor de referência, sob condições especificadas. A partir das informações obtidas é possível estabelecer uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas [VIM, 2012].

Um laboratório de calibração no Brasil, para obter reconhecimento de sua competência técnica deve ser acreditado junto a Rede Brasileira de Calibração (RBC) sob a coordenação da CGCRE do INMETRO. Também deve ter um sistema de gestão laboratorial em conformidade com os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 e normas da CGCRE/INMETRO.

Um laboratório de calibração em acordo com os requisitos da norma NIT-DICLA-021 – Expressão da incerteza de medição por laboratórios de calibração declara para seus clientes um escopo de serviço de calibração, onde são apresentados informações sobre a faixa de calibração e a capacidade de medição e calibração que o laboratório pode obter em uma calibração de rotina.

A ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 descreve no seu item 5.4.6 - Estimativa de Incerteza de Medição, que um laboratório de calibração ou ensaio deve ter e aplicar um procedimento para estimar a incerteza de medição de todas as calibrações e quando for estimada a incerteza de medição, todos os componentes de incerteza que sejam importantes para uma determinada situação devem ser considerados usando-se métodos apropriados.

A norma não exige a seleção de um método em específico, mas deixa bem clara a necessidade de utilização de métodos apropriados, bem como uma avaliação crítica para identificar as fontes de incerteza de medição na calibração.

Fundamentalmente a calibração consiste em submeter um sistema de medição a valores conhecidos do mensurando e avaliar a sua resposta. O número de repetições e o número de diferentes valores do mensurando podem variar conforme a finalidade da calibração. O valor do mensurando deve ser conhecido com incertezas sempre muito menores, pelo menos 10 vezes menores que as incertezas esperadas para o sistema de medição que está sendo calibrado [Albertazzi, 2008].

Normalmente o valor do mensurando é definido através da utilização de padrões. Os tipos de padrões e a maneira de empregá-los determinam diferentes procedimentos de medição ou calibração. Diferentes procedimentos determinam diferentes modelos de equação de medição e diferentes fontes de incerteza de medição a serem consideradas [Albertazzi, 2008].

Uma calibração pode ser realizada pelo método direto ou pelo método indireto. No método direto o padrão basicamente é composto por medidas materializadas. No método indireto o padrão utilizado normalmente é um sistema de medição padrão, sendo necessária a utilização de um dispositivo para gerar a grandeza a ser medida. As figuras 2 e 3 apresentam respectivamente um modelo para o método de calibração direto e indireto.

Na calibração direta o padrão é aplicado diretamente ao sistema de medição em calibração. Na calibração indireta a grandeza é gerada por um dispositivo auxiliar e medida pelo sistema de medição padrão e pelo sistema de medição em calibração.

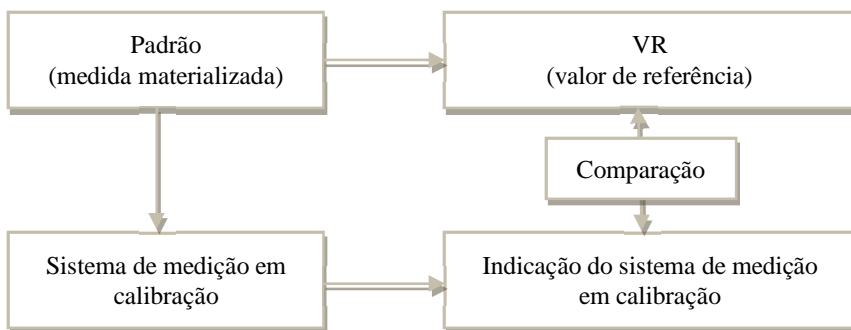


Figura 2 – Calibração direta de um sistema de medição
Fonte: Albertazzi, 2008

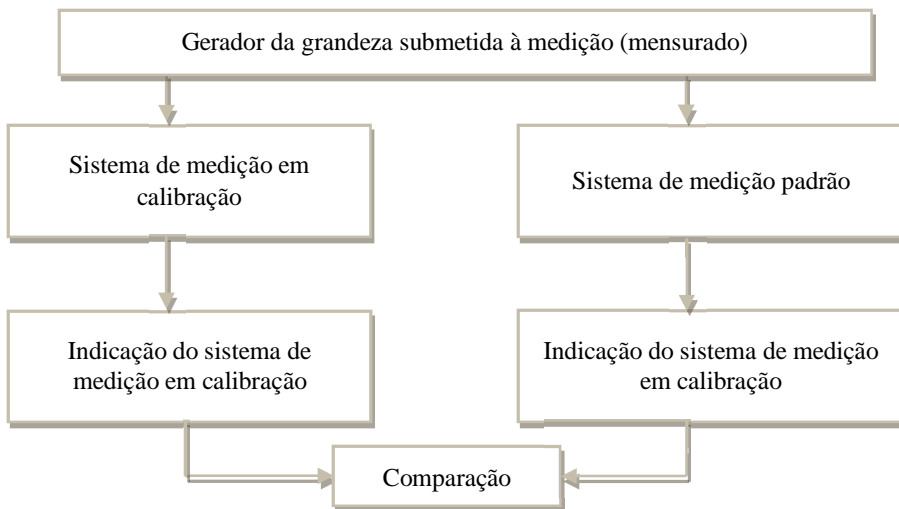


Figura 3 – Calibração indireta de um sistema de medição
Fonte: Albertazzi, 2008

2.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O conceito de “incerteza” utilizado no contexto atual como um atributo quantificável é relativamente novo na história da medição, embora “erro” e “análise de erro” tenham sido, há muito, uma parte da prática da metrologia.

Atualmente é plenamente entendido que, quando todos os componentes de erro conhecidos ou suspeitos tenham sido avaliados e as correções adequadas tenham sido aplicadas, ainda permanece uma incerteza sobre quão correto é o resultado declarado, isto é, uma dúvida acerca de quão corretamente o resultado da medição representa o valor da grandeza que está sendo medida [INMETRO, 2012].

No contexto de atual, considerando a abordagem da incerteza, a medição não tem o objetivo de determinar um valor tão próximo quanto possível. Preferencialmente supõe-se que com o conhecimento obtido da informação oriunda da medição é possível apenas atribuir ao mensurando um intervalo de valores razoáveis, baseado na suposição que a medição tenha sido executada corretamente.

A incerteza de medição representa a dúvida a cerca da medição, sendo representada por um parâmetro não negativo que caracteriza a

dispersão de valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas [VIM, 2012].

A norma NIT-DICLA-021 – Expressão da incerteza de medição por laboratórios de calibração estabelece os requisitos que os laboratórios de calibração devem declarar quando apresentam um resultado completo da calibração. O resultado completo constitui uma estimativa do mensurando e uma estimativa da incerteza associada.

O conhecimento completo do mensurando requer uma infinita quantidade de informações. As fontes de incerteza são fenômenos que não permitem que o resultado de medição seja caracterizado por um único valor. Na prática, há muitas possíveis fontes de incerteza em uma medição. A norma EA-04 Expressão da Incerteza de Medição na Calibração apresenta alguns exemplo de fonte de incerteza, conforme abaixo.

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não-representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e) erro de tendência pessoal na leitura de mostradores analógicos;
- f) resolução finita de um sistema de medição ou limiar de mobilidade;
- g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas ou usando algoritmo de redução de dados;
- i) aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições de aparentemente idênticas.

Essas fontes de incerteza não são necessariamente independentes e algumas das fontes de a) até i) podem contribuir para a fonte j). Naturalmente, um efeito sistemático não identificado não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de uma medição, porém contribui para seu erro [INMETRO, 2012].

A incerteza de medição associada ao resultado de uma calibração representa a dúvida associada na determinação da estimativa da respectiva característica metrológica, como exemplo, uma calibração que apresenta como resultado a correção a ser aplicada em um sistema

de medição e sua incerteza expandida associada, que reflete a dúvida associada à determinação do valor da correção.

Uma forma adequada de avaliar a incerteza de medição e expressar os resultados da calibração, de forma a avaliar a conformidade com uma especificação, é a apresentação dos parâmetros de tendência de medição e repetibilidade e as respectivas incertezas associadas. Com a determinação dessas características é possível determinar o erro máximo do sistema de medição.

O erro máximo ($E_{\text{máx}}$) de um sistema de medição, em módulo, pode ser obtido através dos resultados encontrados em uma calibração conforme. A equação 1 apresenta uma forma para a determinação do erro máximo de um sistema de medição [Albertazzi, 2008].

$$E_{\text{máx}} = \pm (|T_d| + t.s)_{\text{máx}} \quad (1)$$

Onde:

$E_{\text{máx}}$ – erro máximo;

T_d – tendência instrumental do sistema de medição;

t.s – repetibilidade do sistema de medição.

A repetibilidade de medição é a precisão da medição sob um conjunto de condições. As condições para a obtenção da repetibilidade incluem o mesmo procedimento de medição, mesmos operadores, mesmo sistema de medição, mesmo local, mesmas condições de operação, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo [VIM, 2012].

O erro máximo admissível é o valor extremo do erro de medição, com respeito a uma referência conhecida, admitido por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição [VIM, 2012].

O erro máximo obtido em uma calibração pode ser comparado contra o erro máximo admissível, especificações de fabricante, referências normativas para uma avaliação da confiabilidade e aceitação dos resultados de um sistema de medição.

O documento “Guia para Expressão para Incerteza de Medição – Avaliação de Dados de Medição”, mundialmente conhecido como GUM, é o documento mais utilizado atualmente para a determinação e avaliação da incerteza de medição. O GUM clássico baseia-se no método de propagação de incertezas para a avaliação da incerteza de medição.

Nos últimos anos, a evolução da metrologia, em especial nas áreas de calibração e ensaios, fez com que esse universo de laboratórios ensaio se deparasse com um problema na avaliação de suas incertezas: a sistemática clássica adotada pelo GUM, embora muito abrangente, apresentava limitações e algumas vezes poderiam gerar valores inconsistentes, seja pela complexidade dos cálculos, efeitos de não linearidade na equação de medição ou pelo não cumprimento dos requisitos para aplicação do GUM clássico [INMETRO, 2012].

Surge à possibilidade de aplicação de outros métodos para a avaliação da incerteza de medição. Um método que entre eles se destaca é o método de simulação de Monte Carlo (SMC). A utilização da técnica de simulação de Monte Carlo para avaliar incertezas de medição na metrologia não é uma novidade. Em 2007 o GUM publicou o suplemento 1 que busca estabelecer as bases para uma correta aplicação da SMC na avaliação de incertezas de medição [Donatelli, 2005].

2.2.1 Método clássico do GUM

O GUM “Guia para Expressão para Incerteza de Medição”, editado por sete organizações internacionais, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML, e a norma EA-4/02 “Expressão da Incerteza de Medição na Calibração”, também baseado nas recomendações do GUM, são os documentos mais utilizados para a determinação da incerteza de medição nos laboratórios de calibração.

O GUM estabelece regras gerais para calcular e expressar a incerteza de medição. O método clássico tem como base a propagação de incertezas através do modelo matemático da medição. Tal lei afirma que a incerteza de cada fator de influência da medição é propagada através de uma expansão de primeira ordem da série de Taylor. Assume-se então que, devido à aplicabilidade do Teorema do Limite Central, a distribuição de probabilidade para o resultado da medição seguirá uma distribuição normal, ou tipo *t*-student quando o número de medições for relativamente baixo, isto é, quando o grau de liberdade efetivo for baixo, geralmente inferior a 30.

O método clássico apresentado no GUM tem grande aplicabilidade, mas algumas restrições devem ser consideradas para a obtenção de resultados confiáveis. Em certas situações as condições requeridas pelo Teorema do Limite Central podem não ser completamente satisfeitas e pode-se obter um resultado inadequado.

Para a aplicação adequada, as seguintes premissas devem ser consideradas [JORNADA, 2007]:

- a) linearização do modelo matemático de medição fornece uma representação inadequada, geralmente realizada através da aproximação para uma série de Taylor de primeira ordem;
- b) aplicabilidade do Teorema do Limite Central, implicando representação da função densidade de probabilidade do mesurando através de uma distribuição Normal ou *t*-student;
- c) adequação da equação de Welch-Satterthwaite para a determinação do número de graus de liberdade efetivos da medição.

O GUM descreve, para uma dada equação de medição, “Se a relação funcional entre o mensurando Y , e suas grandezas de entrada é não linear e se uma expressão de primeira ordem da série de Taylor da relação não é uma aproximação aceitável, então a distribuição de probabilidade de Y não pode ser obtida pela convolução das grandezas de entrada. Em tais casos, outros métodos numéricos ou analíticos são requeridos”.

Além das limitações inerentes ao método clássico de avaliação da incerteza de medição adotado pelo GUM, alguns fatores ainda podem contribuir para sua adequada aplicação, como a complexidade conceitual, necessidade de construção de um modelo matemático e a utilização de conceitos de probabilidade e estatística nem sempre claros para os profissionais de metrologia [20].

A figura 4 apresenta um fluxograma da metodologia do GUM. Para expressar a incerteza de medição ou calibração conforme o GUM ou a EA-4/02 os seguintes passos devem ser seguidos [36]:

- a) expressar em termos matemáticos a dependência do mensurando (grandeza de saída) Y com as grandezas de entrada X_i , conforme a equação $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$. No caso de uma comparação direta de dois padrões, a equação pode ser muito simples, por exemplo, $Y = X_1 + X_2$. Em calibração, usualmente a grandeza de saída representa uma característica metrológica de um sistema de medição, por exemplo, a tendência.
- b) identificar e aplicar todas as correções significativas: corrigir erros sistemáticos para não incorporá-los na incerteza;
- c) relacionar todas as fontes de incerteza: verificar tudo o que pode influenciar no resultado;

- d) calcular os coeficientes de sensibilidade: calcular as derivadas parciais de $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ em relação a cada X_i ;
- e) calcular as incertezas do tipo A: fonte de incertezas obtidas através de meios estatísticos;
- f) calcular as incertezas do tipo B: fonte de incertezas obtidas por outros meios que não os estatísticos;
- g) calcular as correlações entre as fontes de incerteza, quando elas de fato existam e sejam significantes;
- h) calcular as contribuições de incerteza: estimar quanto cada uma das fontes de incerteza, do tipo A e do tipo B, influenciam na incerteza global da medição, por meio da aplicação dos coeficientes de sensibilidade;
- i) obter a incerteza padrão combinada $u_c(y)$: é a incerteza considerando todas as fontes de incerteza, como um desvio padrão, calculada de acordo com a equação 2 para quando não existem ou não são significantes os efeitos de correlação entre as grandezas de entrada X_i , e de acordo com a equação 3 para quando é necessário considerar efeitos de correlação.
- j) obter a incerteza expandida U e o intervalo de abrangência determinado para o mensurando Y , por meio da multiplicação incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k , $U = k \cdot u_c(y)$.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right] u^2(x_i) \quad (2)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right] u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3)$$

Onde:

$u_c(y)$: incerteza padrão combinada ou incerteza combinada;

$u(x_i)$: incertezas padrões para as grandezas de entradas X_i ;

$u(x_i, x_j)$: covariância estimada, associada as estimativas x_i e x_j ;

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$: derivadas parciais de y para a determinação dos coeficientes de sensibilidade.

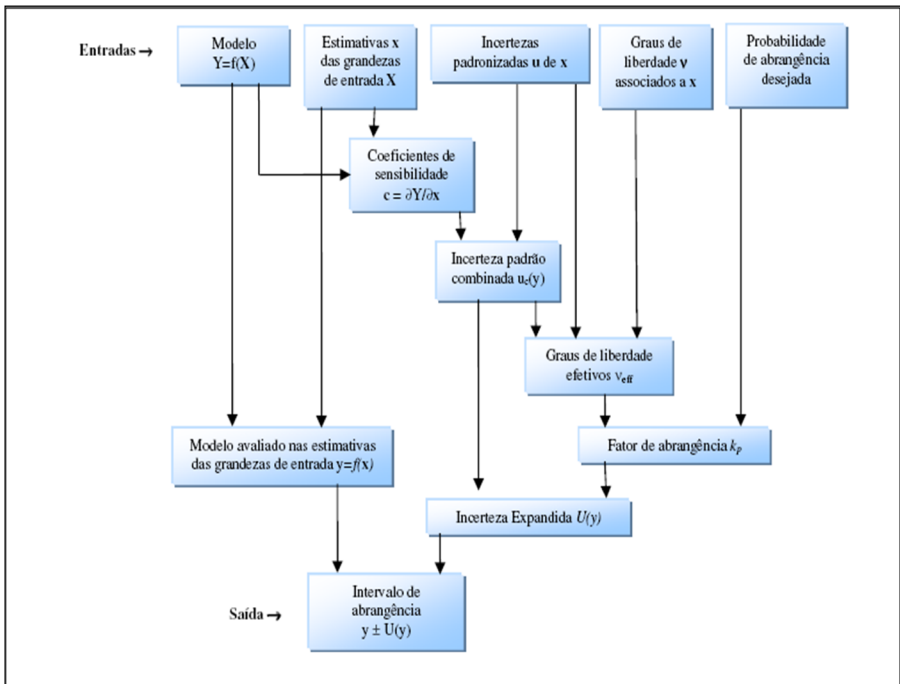


Figura 4 – Determinação do resultado de uma medição usando o GUM

Fonte: Donatelli, 2005.

2.2.2 Método de simulação de Monte Carlo (SMC)

Nos casos onde o método clássico do GUM não é recomendável, uma alternativa para a avaliação da incerteza de medição é utilizar método baseado na Simulação de Monte Carlo (SMC).

O suplemento 1 do GUM foi recentemente publicado, pelo BIPM através do comitê JCGM - *Jointe Committee for Guides in Metrology*, denominado de JCGM 101 *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, com orientações sobre a utilização da SMC na avaliação da incerteza de medição.

O método de simulação de Monte Carlo para avaliação da incerteza está baseado no conceito de propagação de distribuições, diferentemente do método clássico do GUM que está baseado na propagação de incertezas. O conceito da SMC consiste primeiramente

em assumir uma função densidade de probabilidade (pdf) apropriada para cada fonte de incerteza, então essas distribuições são propagadas n vezes através da equação de medição e os valores de média e desvio padrão dos resultados são estimados.

Para a realização da SMC é necessário à utilização de ferramentas computacionais, devido ao volume de informação e complexidade de cálculos envolvidos para a determinação da distribuição de probabilidade de saída.

A figura 5, conforme a norma JCGM 101:2008 *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, apresenta o conceito de propagação de distribuições de probabilidade.

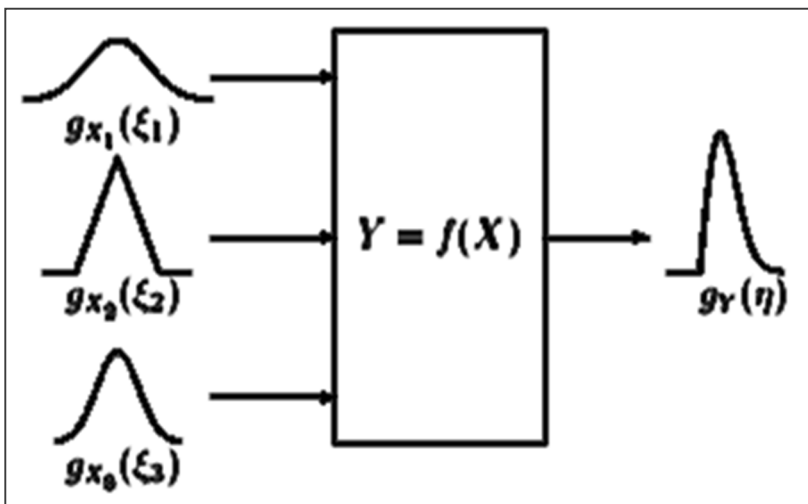


Figura 5 – Ilustração da propagação de distribuições.

Fonte: *Joint Committee for Guides in Metrology*, 2008

As informações de entrada para aplicação do método de SMC são semelhantes a usadas na abordagem do GUM, parte-se de um modelo matemático da medição descrevendo o mensurando a partir das variáveis de entrada e suas informações estatísticas.

Em acordo com o método do GUM, cada variável de entrada deve ser caracterizada pela sua função densidade de probabilidade, sua média, desvio padrão e graus de liberdade. Na SMC, esse último parâmetro não é necessário nos cálculos, mas não é irrelevante para a

análise dos resultados. A figura 6 apresenta um fluxograma para a avaliação da incerteza de medição usando a SMC.

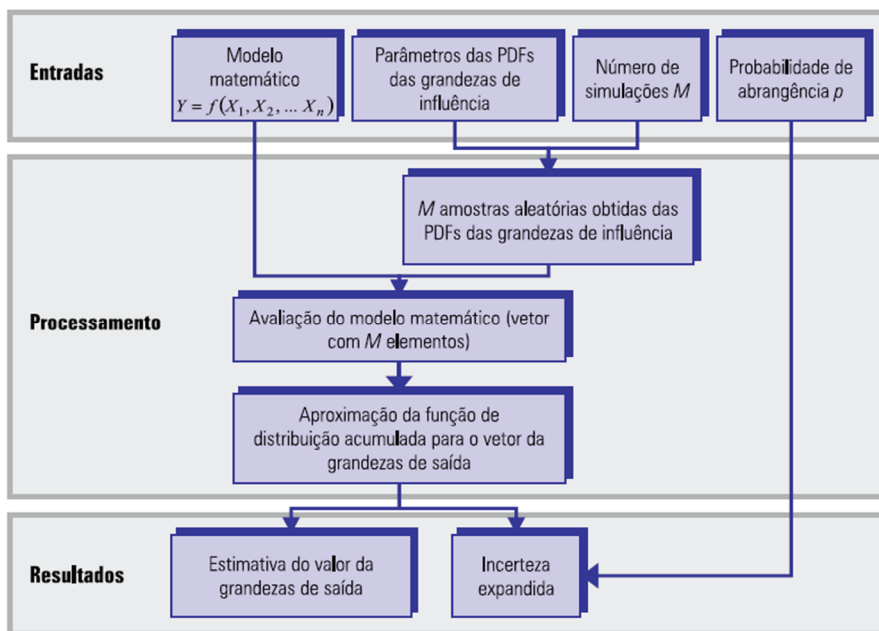


Figura 6 - Fluxograma da avaliação de incerteza de medição usando SMC

Fonte: Donatelli, 2005

Na SMC, fatores críticos e limitantes para o GUM, como modelos matemáticos não lineares, distribuições assimétricas das grandes de influência e contribuições não normais dominantes não precisam receber atenção especial. De forma análoga as considerações sobre normalidade da estimativa de saída e aplicabilidade da fórmula de Welch-Satterthwaite tornam-se desnecessárias.

Uma vantagem do SMC é que ele fornece uma aproximação da função de distribuição para a grandeza de saída (mensurando), sendo que qualquer parâmetro estatístico, incluindo o resultado da medição, incerteza de medição padrão associada e o respectivo intervalo de abrangência, podem ser obtidos [Souza, 2006]. Uma desvantagem do SMC é a impossibilidade de identificar uma fonte de incerteza com contribuição dominante na avaliação de incerteza.

Apesar do método de SMC desconsiderar fatores críticos para a determinação da incerteza pelo GUM clássico, devido à necessidade

computacional da SMC, outros fatores passar a ter relevância na qualidade dos resultados obtidos, pode-se citar [Donatelli, 2005]:

- representatividade do modelo matemático da equação de medição;
- qualidade da caracterização das variáveis de entrada;
- características do gerador de números pseudoaleatórios utilizado;
- número de simulações realizadas (M);
- procedimento para definição do intervalo de abrangência.

Pode-se, por exemplo, avaliar a utilização do EXCEL em comparação com um software dedicado para a simulação e geração de valores. Um software dedicado fornece muito mais possibilidades de valores e uma melhor análise das funções densidade de probabilidade, gerando resultados de qualidade superior ao EXCEL. O número de simulações também é determinante, algumas referências recomendam valores na ordem de 10^5 ou 10^6 para obtenção de resultados.

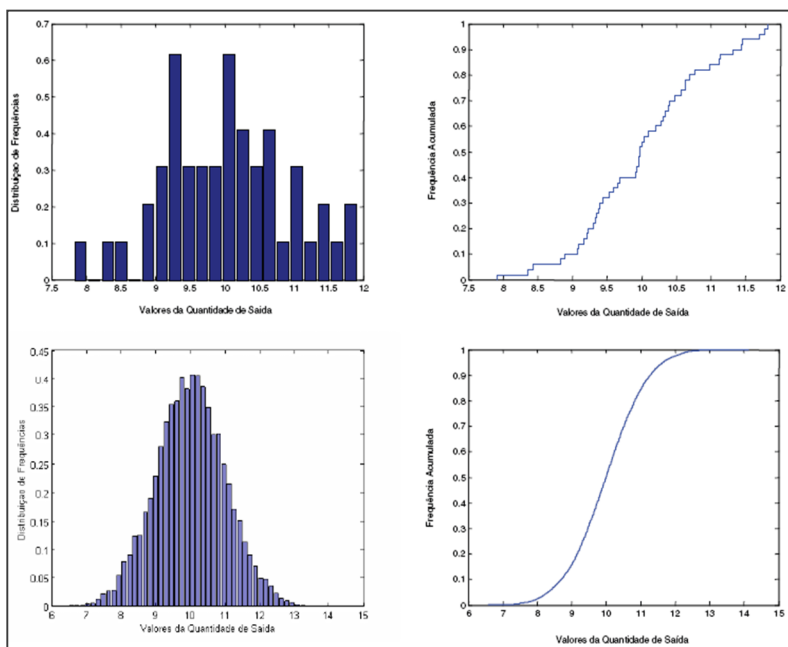


Figura 7 – Distribuições empíricas obtidas por geração de números aleatórios com distribuição $N(10;1)$, para distintos tamanhos de amostras ($M=50$, na posição superior e $M=10^4$ na posição inferior)

Fonte: Donatelli, 2005

A figura 7 apresenta uma análise do efeito da variação de M sobre a distribuição empírica de uma variável distribuída normalmente, com média $\mu = 10$ e desvio padrão $\sigma = 1$. A linha de gráficos superior corresponde aos resultados obtidos para $M = 50$. A linha de gráficos inferior mostra os resultados obtidos com uma amostragem muito maior, $M = 10^4$.

A combinação das vantagens da SMC com a evolução dos meios computacionais de processamento de dados indica que a SMC pode vir a ser, no futuro, a técnica preferida para a avaliação de incertezas de medição, substituindo parcialmente ou totalmente o método de propagação de incertezas. Entretanto, ainda existem questões que precisam ser tratadas a fim de tornar isso possível [Donatelli, 2005].

A tabela 1 apresenta uma comparação entre as vantagens e desvantagens dos métodos de avaliação da incerteza de medição [Jornada, 2005].

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens entre métodos de avaliação de incerteza de medição

Método	Vantagens	Desvantagens
GUM	Cálculos geralmente simples; não necessita de emprego de softwares específicos. Não requer conhecimentos avançados em matemática	As premissas para a sua aplicação precisam ser atendidas. Derivadas podem ser difíceis. Aproximações do método podem introduzir erros não conhecidos na incerteza calculada
SMC	Dispensa cálculo de derivadas parciais. Não requer a linearidade do modelo. Não requer a aplicabilidade do Teorema Central do Limite.	Qualidade do resultado depende da qualidade do algoritmo pseudoaleatório e do número de gerações (M). Requer emprego de software.

Fonte: Jornada, 2007

3 PARAMETROS CARACTERÍSTICOS DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO, PADRÕES E DISPOSITIVOS AUXILIARES

Em acordo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 os laboratórios de calibração devem ser aparelhados com todos os padrões e dispositivos auxiliares necessários para o desempenho correto das calibrações. Também devem garantir que os padrões e dispositivos auxiliares atendam a exatidão requerida e as especificações pertinentes.

Uma das etapas mais importantes para a definição de um processo de calibração é a seleção do padrão a ser utilizado, bem como qualquer dispositivo auxiliar necessário para gerar o mensurando.

Um padrão de medição é a definição da grandeza, com um valor determinado e uma incerteza de medição associada, utilizada como referência. A realização da definição de uma grandeza pode ser fornecida por um sistema de medição, uma medida materializada ou um material de referência. [VIM, 2012].

O comportamento metrológico de um sistema de medição está relacionado com a característica de resposta a um sinal de medição. De uma forma geral, sistema de medição é composto por uma cadeia de medição definida como sequência de elementos que constitui o trajeto do sinal de medição desde o estímulo até a resposta [Flesch, 2001].

Uma cadeia de medição apresenta basicamente 3 módulos funcionais bem definidos: transdutor, unidade de tratamento do sinal e dispositivo mostrador ou registrador. Cada um desses módulos pode constituir uma unidade independente ou pode estar fisicamente integrada ao sistema de medição [Albertazzi, 2008]. A figura 8 apresenta um modelo de cadeia de medição e seus módulos.

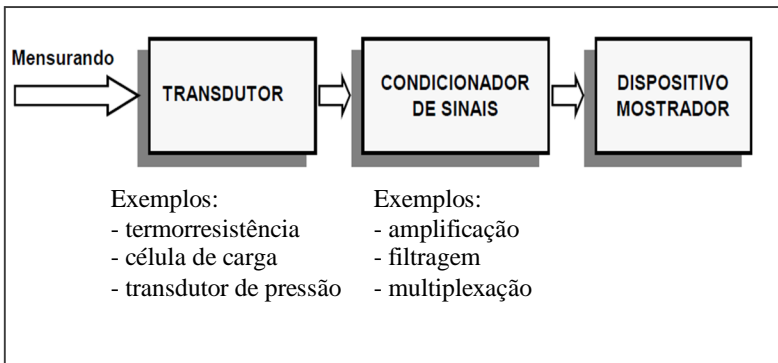


Figura 8 – Modelo genérico de cadeia de medição

Fonte: Barp, 2000.

Para garantir a confiabilidade nas calibrações realizadas um laboratório de calibração deve avaliar todas as características metrológicas dos padrões e dispositivos auxiliares que contribuem para o resultado da calibração.

3.1 CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

A norma ABNT NBR ISO 9000:2005 define característica metrológica. A característica metrológica representa uma propriedade que pode influenciar os resultados de medição apresentados por um sistema de medição. Um sistema de medição, normalmente apresenta várias características metrológicas que afetam seu desempenho.

Uma característica metrológica pode ser utilizada como uma fonte de incerteza para a avaliação de incerteza em uma calibração, como exemplo a resolução ou repetibilidade. Também pode ser realizada a calibração de uma característica metrológica, como exemplo a tendência ou correção de um sistema de medição.

Usualmente os fabricantes apresentam os dados relativos a uma característica metrológica em valores percentuais da faixa de medição. É usual também que esses dados representem valores mínimo, típico ou máximo de um dado parâmetro [Darrigo, 2001].

As características metrológicas de um sistema de medição podem ser agrupadas em quatro categorias: quanto à faixa de utilização, quanto à indicação, quanto à relação de estímulo e resposta e quanto aos erros de medição. Neste trabalho serão apresentadas as principais

características metrológicas adotadas como fonte de incertezas de medição em processos de calibração.

3.1.1 Valor de uma divisão e resolução

O valor de uma divisão e a resolução são características metrológicas com relação à indicação. A indicação pode ser realizada de forma analógica ou digital.

O valor de uma divisão corresponde a diferença entre duas marcas sucessivas na escala de um indicador analógico. No caso de indicadores digitais temos o incremento digital que representa a menor variação possível que pode ser indicada pelo mostrador digital.

A resolução é a menor variação da grandeza que pode ser percebida através da indicação ou a menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida [VIM, 2012]. No caso de indicadores digitais a resolução e o incremento digital são iguais, no caso de indicadores analógicos a

Usualmente laboratórios de calibração adotam a resolução como uma fonte de incerteza avaliada pelo método do tipo B. No caso de um mostrador com indicação digital é adotado, usualmente, uma distribuição de probabilidade uniforme e no caso de um mostrador com indicação analógica é adotada uma distribuição de probabilidade triangular [Serenio, 2009].

3.1.2 Erro de linearidade

Nos sistemas de medição lineares a relação entre o estímulo e resposta de um sistema de medição deveria poder ser representada por uma linha reta. Na prática, devido a limitações construtivas, ou pela não idealidade dos fenômenos físicos envolvidos, a curva obtida não é uma linha reta [Albertazzi, 2008].

O erro de linearidade é um parâmetro que exprime o quanto a curva característica de resposta real se afasta da linha reta ideal. Diversos procedimentos podem ser utilizados para a determinação do erro de linearidade, sendo os mais usuais: o método terminal, o método independente e o método dos mínimos quadrados (MMQ) [Darrigo, 2001].

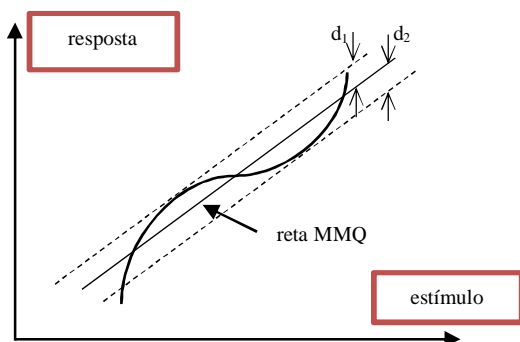


Figura 9 – Erro de linearidade pelo MMQ

Fonte: Albertazzi, 2008

Legenda: d_1 e d_2 , distâncias entre a reta MMQ e a curva característica de resposta real. MMQ, método dos mínimos quadrados.

3.1.3 Sensibilidade

O conceito de sensibilidade é definido como o quociente entre a variação de uma indicação de um sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida. A sensibilidade pode depender da grandeza medida [VIM,2012].

A sensibilidade corresponde à inclinação da curva característica de resposta do sistema de medição. Para sistemas de medição lineares a sensibilidade é constante e corresponde à tangente do ângulo de inclinação da reta que expressa a curva característica de resposta. No caso de sistemas de medição não lineares a sensibilidade é variável e pode ser calculada através da derivada da curva característica de resposta. A figura 10 apresenta a sensibilidade para um sistema de medição linear e um não linear.

A sensibilidade não é uma fonte de incerteza. A fonte de incerteza devido à sensibilidade de sistemas de medição é usualmente chamada pelos fabricantes como “erro de ganho”. Geralmente considerado uma fonte de incerteza avaliada pelo tipo B e uma distribuição uniforme.

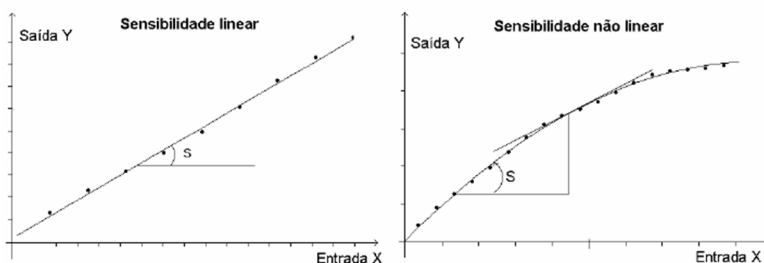


Figura 10 – Sensibilidade de um sistema de medição

Fonte: Darrigo, 2001

3.1.4 Erro de histerese

Sistemas de medição frequentemente envolvem partes móveis. No uso normal, as peças são movidas pela ação do mensurando e produzem a indicação. Se o mensurando cresce ou decresce em intensidade, o sentido do movimento é invertido, produzindo indicações que são afetadas pela histerese, dando origem a erros de medição.

O erro de histerese é quantificado como a diferença entre a indicação para um dado valor do mensurando quando esse é atingido por valores decrescentes e a indicação quando o mensurando é atingido por valores crescentes [Albertazzi, 2008].

Usualmente pode-se encontrar o erro de histerese apresentados como um valor percentual da faixa nominal do sistema de medição, como um valor percentual típico da faixa nominal do sistema de medição e como um valor percentual máximo da faixa nominal do sistema de medição [Darrigo, 2001].

Em certificados de calibrações de sistemas de medição, quando se tem dados de calibração referentes à vários ciclos de carregamento e descarregamento, a histerese é calculada como a diferença entre a média das indicações de um mesmo valor do mensurando, quando o mensurando está decrescendo em valor e quando o mensurando está crescendo em valor [Darrigo, 2001].

3.1.5 Estabilidade e deriva

O conceito de estabilidade de um sistema de medição é definido como a propriedade de um sistema de medição segundo a qual este mantém as suas propriedades metrológicas constantes ao longo do tempo. A estabilidade pode ser quantificada por várias maneiras, como

por exemplo: pela duração de um intervalo de tempo ao longo do qual uma propriedade metrológica varia numa quantidade definida; pela variação de uma propriedade ao longo de um intervalo de tempo definido [VIM,2012].

Quando nada é dito em contrário, a estabilidade é estabelecida em relação ao tempo. Entretanto, a estabilidade pode também ser estabelecida em função de outra grandeza de interesse, como por exemplo, a temperatura. O termo deriva é preferível para descrever a taxa de variação de uma característica que ocorre de maneira lenta e uniforme com o tempo ou outra grandeza de influência [Albertazzi, 2008].

3.1.6 Precisão e repetibilidade

A precisão de medição é definida como o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. É geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação. A precisão de medição é utilizada para definir a repetibilidade de medição e a reprodutibilidade de medição [VIM,2012].

A repetibilidade é definida como a precisão de medição em condições de repetibilidade. As condições de repetibilidade compreendem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares em um curto espaço de tempo.

A repetibilidade exprime a intensidade com que agem os erros aleatórios em repetidas medições do mesmo mensurando, efetuadas sob a mesma condição de medição. Como o erro aleatório é imprevisível, a estatística é utilizada para definir uma faixa na qual, com uma dada probabilidade, espera-se encontrar o erro aleatório de um sistema de medição.

3.1.7 Reprodutibilidade

A reprodutibilidade é definida como a precisão de medição conforme um conjunto de condições de reprodutibilidade. As condições de reprodutibilidade compreendem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no

mesmo objeto ou em objetos similares. Na medida do possível, é conveniente especificar as condições que mudaram e aquelas que não.

A reprodutibilidade exprime a intensidade com que agem os erros aleatórios e sistemáticos em repetidas medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição. Com a seleção adequada das condições variadas o valor da reprodutibilidade espelha melhor o comportamento real do sistema de medição nas condições de uso [VIM, 2012].

3.1.8 Tendência

Não é possível conhecer exatamente o valor do erro sistemático de um sistema de medição. Seria necessário um padrão exato e um número infinito de medições repetitivas deste padrão para eliminar a incerteza de medição devido à presença de efeitos aleatórios.

Na prática utiliza-se a tendência de medição, que é definida como uma estimativa de um erro sistemático de um sistema de medição. O erro sistemático é aproximadamente compensado quando a respectiva tendência de medição é subtraída do resultado de medição não corrigido. Como há sempre uma incerteza associada à tendência, a compensação do erro sistemático não pode ser perfeita.

Durante uma calibração, usualmente, é determinado a tendência instrumental de um sistema de medição, que é definida como a diferença entre a média de repetidas indicações e um valor de referência [VIM, 2012]. A tendência normalmente é determinada em condições de laboratórios, com condições ambientais controladas. Se as condições de uso do sistema de medição diferir das de laboratório, pode ser necessário aplicar fatores de correção adicionais [Albertazzi, 2008].

3.1.9 Erro máximo

Entende-se por erro máximo o valor absoluto do maior valor de erro de medição que pode ser cometido pelo sistema de medição em toda a sua faixa de medição e nas condições operacionais em que é avaliado. Em uma curva de erros, conforme figura 11, o erro máximo corresponde ao ponto mais afastado da linha do zero, o que pode ocorrer na região positiva ou negativa da curva.

O erro máximo corresponde à soma da tendência instrumental mais a repetibilidade, conforme apresentado na curva de erros representada pela figura 11. Toda a curva de erros está contida dentro da faixa compreendida entre $-E_{\max}$ e $+E_{\max}$. O erro máximo é o parâmetro

numérico que melhor descreve a qualidade global de um sistema de medição [Albertazzi, 2008]. O erro máximo é definido sob as condições de uso recomendadas pelo fabricante do sistema de medição.

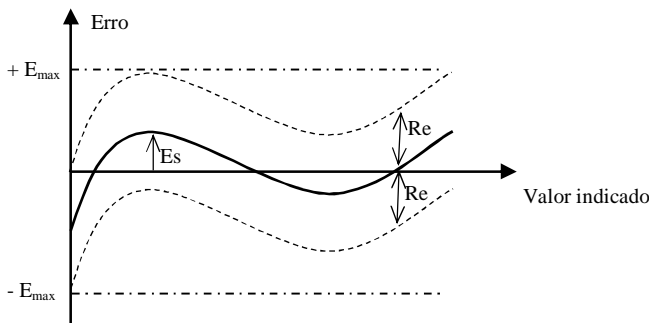


Figura 11 – Erro máximo de um sistema de medição

Fonte: Albertazzi, 2008

Legenda:

E_{\max} , erro máximo (efeitos sistemáticos e aleatórios);

E_s , erro sistemático;

Re , repetibilidade.

3.2 ESPECIFICAÇÕES DE FABRICANTES

As especificações de fabricantes, além de fornecerem dados como a faixa nominal dos sistemas de medição, temperatura de operação, tensão de saída e impedância de entrada e de saída, fornecem dados relativos ao comportamento metrológico dos sistemas de medição.

Pode-se notar nas especificações dos fabricantes a falta de conhecimento de conceitos metrológicos. Na prática observa-se uma confusão de termos e definições entre documentos formais. Até para os termos mais básicos de metrologia e instrumentação é possível observar divergências entre o VIM, GUM, normas das áreas de metrologia e qualidade, manuais de fabricantes e publicações técnicas em geral [Flesch, 2001].

Em muitas situações práticas de avaliação da incerteza de medição certamente, para muitos parâmetros ou fontes de incerteza de medição, haverá necessidade de se arbitrar valores, por falta de informações confiáveis. Será também necessário assumir distribuições

de probabilidade que melhor caracterizem os dados do parâmetro, assim como atribuir um nível de confiança aos dados.

É comum encontrar nos catálogos dos fabricantes (*Data Sheets*), especificações onde são atribuídos aos dados, informações dos tipos: valor mínimo, valor típico, valor máximo ou combinações desses valores. Entretanto é possível encontrar fabricantes que não fazem referência alguma acerca do dado fornecido [Darrigo, 2001]. Nesses casos, foi considerado nesse trabalho que os valores fornecidos são típicos devido à falta de mais informações.

3.2.1 Valores típicos ou nominais

Os valores típicos ou nominais são valores utilizados para representar as características de todo um grupo de sistemas de medição. Para expressá-la, fabricantes utilizam diferentes tipos de valores resumidos. Os mais usados são moda (ou pico), média e mediana. Quando a distribuição que representa a grandeza é centrada entre seus limites, esses valores são praticamente coincidentes. Entretanto, se uma distribuição é deslocada do centro, esses valores podem se diferenciar consideravelmente.

Em geral, o valor típico é utilizado como dado apresentado no catálogo. A análise da folha de dados e o questionamento aos fabricantes são muitas vezes necessários para esclarecimento do tipo de informação fornecida [Darrigo, 2001].

3.2.2 Limites de máximo ou mínimo

São valores garantidos pelo fabricante dentro das condições de teste especificadas. Geralmente são os únicos parâmetros medidos durante a produção e que servem de parâmetros de aceitação do usuário. A utilização dos valores de máximo e mínimo geralmente leva a fornecer as condições de pior caso para o sistema de medição em análise.

É usual encontrar catálogos de fabricantes como a *Analog Devices*, *Burr-Brown*, *National* e *Philips*, onde as folhas de dados contêm três colunas identificadas por valores mínimo, típico e máximo. Nestas folhas de dados, os parâmetros podem ser fornecidos com um ou mais desses valores.

Dispondo-se dos limites, de acordo com essa classificação e conhecendo-se, ou estimando-se, o intervalo de abrangência, adotou-se na parametrização os critérios estabelecidos nos itens 3.2.3 a 3.2.7.

3.2.3 Valores: Mínimo, Típico e Máximo.

Quando são fornecidos todos esses valores, considera-se o parâmetro por uma distribuição normal, onde o limite inferior de truncamento é o valor mínimo especificado; a média é o valor típico; e o limite superior de truncamento é o valor máximo.

Calcula-se o desvio padrão, considerando o valor de truncamento da normal correspondente ao nível de confiança fornecido para o dado. Na ausência de maiores informações sobre o nível de abrangência nas especificações do fabricante, quando necessário adotou – se o nível de abrangência de 99,9% ($3,3 \sigma$) para valores de mínimo, típico e máximo.

Esse nível de abrangência foi adotado devido à falta de informações mais específicas sobre a incerteza atribuída a alguns instrumentos de boa qualidade e a referências encontradas na literatura em geral, especialmente na área eletrônica [Darrigo, 2001].

3.2.4 Valores: Mínimo e Típico ou Típico e Máximo

Quando são encontradas especificações de valor típico e máximo ou típico e mínimo, considera-se o valor típico como a média da distribuição normal, e o limite inferior e superior de truncamento igual aos valores mínimo e típico respectivamente. Calcula-se o desvio padrão, considerando o valor de truncamento da normal correspondente ao nível de confiança de 99,9% ($3,3 \sigma$).

3.2.5 Valores: Mínimo e Máximo

Quando o valor de um parâmetro é especificado por uma faixa de valores, representado pelos valores de mínimo e máximo, é necessário identificar se esse comportamento está ocorrendo em torno da média igual a zero, ou se esta pode assumir outros valores.

Na falta de informações técnicas que mobilizem melhor julgamento, adotou-se nesse trabalho uma a distribuição uniforme para esse parâmetro, sendo que os valores de máximo e mínimo são os limites da distribuição. Foi considerado um nível de confiança de 99,9% ($3,3 \sigma$).

3.2.6 Valor: Típico

É um tipo de especificação bastante encontrada nas folhas de dados, embora apresente pouca informação em relação à distribuição dos dados. É necessário estimar um valor mínimo ou máximo para o parâmetro, para que se possa calcular o desvio padrão da distribuição normal. Como não se obteve maiores informações de fabricantes com referência a valores máximos e mínimos dos dados, adotou-se o neste trabalho o valor máximo igual ao dobro do valor típico. Recomenda-se, no entanto que uma análise criteriosa seja feita caso a caso.

3.2.7 Valor: Mínimo ou Máximo

Da mesma forma que a especificação anterior, também é bastante encontrada nas folhas de dados, embora apresente pouca informação sobre como esses valores são distribuídos ou obtidos. Adotou-se nesse trabalho a distribuição uniforme, sendo que a estimativa nesse caso recai sobre os limites da distribuição.

Nesses casos foram adotados os limites da distribuição como sendo o valor do parâmetro acrescido de metade do seu valor para o limite superior e subtraído de metade do seu valor para o limite inferior.

4 ESTRUTURA DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO

Usualmente em um processo de calibração é realizada a medição de apenas um mensurando ou grandeza de saída que depende de uma série de grandezas de entrada. A relação funcional entre o mensurando e as grandezas de entrada são representadas através de uma função de medição, conforme a equação 4 para um processo de medição e conforme a equação 5 para um processo de calibração da tendência de um sistema de medição.

Essa equação 4 representa o procedimento de medição e o método de avaliação. Ela descreve como os valores da grandeza de saída são obtidos a partir dos valores das grandezas de entrada [EUROPEAN ACCREDITATION, 1999].

$$Y=f(X_1,X_2,...,X_N) \quad (4)$$

Onde,

Y , grandeza de saída (mensurando);

X_N , grandezas de entrada.

$$Td = VI - VR \quad (5)$$

Onde,

Td , tendência de medição (estimativa do erro sistemático);

VR , valor de referência do mensurando, estabelecido por padrões;

VI , média de um número finito de indicações.

O valor de referência do mensurando, fornecido por um padrão, deve ser conhecido com incertezas sempre muito menores que as esperadas para o equipamento de medição em calibração. Normalmente para isso são utilizados os padrões e dispositivos auxiliares para a definição do valor do mensurando. A escolha de padrões e a maneira de empregá-los durante a realização das medições determinam diferentes métodos de calibração [Albertazzi, 2008].

Uma pesquisa dos principais softwares disponíveis no mercado para avaliação da incerteza de medição foi realizada durante o desenvolvimento desse trabalho. O mais conhecido e utilizado atualmente é o GUM Workbench da Metrodata GmbH. Nesse software é possível avaliar a incerteza de medição pelo método clássico do GUM e

pelo método de SMC além de diversas outras funcionalidades como geração de relatórios, exportação dos dados, etc.

O GUM Workbench possibilita a definição de uma equação de medição pelo usuário através de linhas de comando. É necessário cadastrar as informações sobre as grandezas de entrada, tais como tipo de distribuição, parâmetros da distribuição, coeficiente de correlação entre as grandezas e possíveis observações realizadas. Entretanto não possui um sistema de base de dados e tem um alto custo de aquisição.

Nesse contexto o ambiente de simulação de incerteza de medição proposto neste trabalho tem como objetivo realizar o cálculo da incerteza expandida de medição associada a um resultado de calibração, através do método de simulação de Monte Carlo. Também tem como objetivo auxiliar o usuário na definição de uma equação de medição, que represente a relação entre a grandeza de saída e as grandezas de entrada.

Através da definição de uma função de medição, que represente a relação entre as grandezas de entrada e a grandeza de saída, e do cadastro das características metrológicas de padrões e dispositivos auxiliares utilizados numa calibração, a incerteza de medição do processo de calibração pode ser simulada através do método de Monte Carlo. Como resultado da simulação é apresentado um intervalo de abrangência com um nível de significância de 95% e um histograma dos dados, possibilitando uma avaliação numérica da incerteza de medição e uma avaliação na forma da distribuição de saída obtida como resultado.

Diferentes processos de calibração para uma mesma grandeza de medição podem ser cadastrados. Também, diferentes padrões ou dispositivos auxiliares podem ser cadastrados para o mesmo processo de calibração, bem como diferentes características metrológicas podem ser cadastradas para o mesmo padrão ou dispositivo auxiliar. Dessa forma é possível a comparação entre diferentes processos de calibração e entre diferentes padrões e/ou dispositivos auxiliares.

Para cada processo de calibração deve ser definida a grandeza de medição, os padrões e dispositivos auxiliares envolvidos, bem como uma função de medição que representa o método de medição utilizado. Também, para cada padrão ou dispositivo auxiliar devem ser definidas as características metrológicas e seus respectivos valores.

Para o cadastro das informações é necessário avaliar as características metrológicas dos padrões e dispositivos auxiliares envolvidos no processo de calibração, bem como o impacto das condições ambientais sobre essas características metrológicas. Para cada característica metrológica cadastrada uma distribuição de probabilidade

deve ser definida com seus respectivos valores, sendo que o ambiente de simulação possibilita a escolha de três distribuições de probabilidade: normal, uniforme e triangular.

A simulação através do método de Monte Carlo (SMC) foi adotada devida a sua aplicabilidade, por ser facilmente implantada com ferramentas computacionais e por não apresentar restrições em relação ao modelo matemático da função de medição, como acontece com o método clássico de avaliação da incerteza de medição do GUM.

Outro fator relevante na escolha do método de simulação de Monte Carlo para a avaliação de incerteza de medição do processo de calibração é a eliminação da necessidade de cálculos de derivadas parciais ou coeficientes de sensibilidade [Donatelli, 2005]. A propagação de distribuição de probabilidade proposta pelo método de simulação de Monte Carlo atende a todas as necessidades do ambiente de simulação proposto.

4.1 ANÁLISE E REQUISITOS DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Como forma de atender os objetivos propostos para o ambiente de simulação de incerteza de medição, foi estruturada uma análise dos principais requisitos necessários para o desenvolvimento do ambiente de simulação. O ambiente de simulação proposto neste trabalho deve pelo menos:

- a) possibilitar a definição de uma equação de medição para cada processo de calibração;
- b) possibilitar a realização da simulação do método de Monte Carlo da equação de medição definida;
- c) possibilitar a geração de um histograma dos dados, os valores de média, máximo, mínimo, desvio padrão e intervalo de abrangência corresponde a um nível de confiança de 95%, permitindo uma avaliação na forma da distribuição de probabilidade da grandeza de saída.
- d) possibilitar o acesso a facilidades para a visualização e análise dos dados, tais como a alteração do número de simulações M e do número de classes do histograma;
- e) possibilitar o acesso a um banco de dados de forma a possibilitar a avaliação de diferentes métodos de medição, alterar, incluir, ou editar informações referentes a características metrológicas de padrões e/ou dispositivos auxiliares e das cadeias de medição;

- f) possibilitar meios para exportação e importação dos dados obtidos como resultado das simulações e das informações cadastradas no banco de dados;
- g) possibilitar o cadastro de diferentes características metrológicas para um determinada classe de sistemas de medição;
- h) possibilitar o cadastro de diferentes sistemas de medição para uma mesma classe de sistemas de medição;
- i) possibilitar o cadastro de diferentes cadeias de medição para uma mesma grandeza;
- j) realizar uma verificação das informações cadastradas para um determinado processo de calibração, possibilitando a realização da simulação de Monte Carlo somente quando todas as informações estiverem devidamente inseridas.

AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO

PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO

Nome	Descrição
DMM (Tensao)	Calib. de DMM na escala de tensao
Concetracao KHP	Concetracao de Sol. Padrao 0,1 M d
Concetracao Cadmio	Concetracao de Cadmio em Sol. Pad
Calibracao de massa	Calibracao de uma massa 100g
Temperatura forno	Medicao da temp. do forno pela rac
Indice de acidez em agua	Determ. do Indice de Acidez em Agi

CLASSE DE INSTRUMENTOS

INSTRUMENTOS

IMPORTAR BANCO DE DADOS

EXPORTAR BANCO DE DADOS

GRANDEZAS DE MEDIÇÃO

Nome da Grandeza

Grandeza

- massa
- temperatura
- volume
- tensao eletrica
- forca
- pressao
- concentracao

CADEIAS DE MEDIÇÃO PARA A GRANDEZA SELECIONADA

Nome da Cadeia

Modelos de Cadeia disponíveis

Cadeia	Modelo de Cadeia	OK?
Calibracao de uma massa de 100g	Calib. massa 100g	S

MODELOS DE CADEIAS

EDITAR CADEIAS

SIMULAR CADEIA

Figura 12 - Tela inicial do ambiente de simulação

A figura 12 apresenta a tela inicial do ambiente de simulação incerteza de medição em processos de calibração. Nessa tela inicial é possível visualizar os processos de calibração cadastrados, as grandezas de medição e as respectivas cadeias de medição. Também na tela inicial do ambiente de simulação são apresentadas as opções de exportação e importação do banco de dados, através dos botões “IMPORTAR

BANCO DE DADOS” e “EXPORTAR BANCO DE DADOS” respectivamente.

4.2 ESTRUTURA DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Com o objetivo de facilitar a alteração das informações e o entendimento do usuário, o ambiente de simulação proposto foi estruturado em 3 módulos principais para o cadastro das informações necessárias para a realização da simulação da incerteza de medição. Os 3 módulos para cadastro de informações são:

- cadastro de classe de sistemas e seus respectivos parâmetros ou características metrológicas;
- cadastro de sistemas e dos valores para os parâmetros cadastrados para cada classe;
- cadastro de modelos de cadeias de medição e sua respectiva função de medição correspondente.

Com o cadastro das informações nos 3 módulos principais o ambiente realiza uma verificação das informações. A simulação só é realizada quando todas as informações necessárias foram cadastradas e a cadeia de medição foi determinada. A figura 13 apresenta um modelo da estrutura do sistema e seu fluxo de informações.

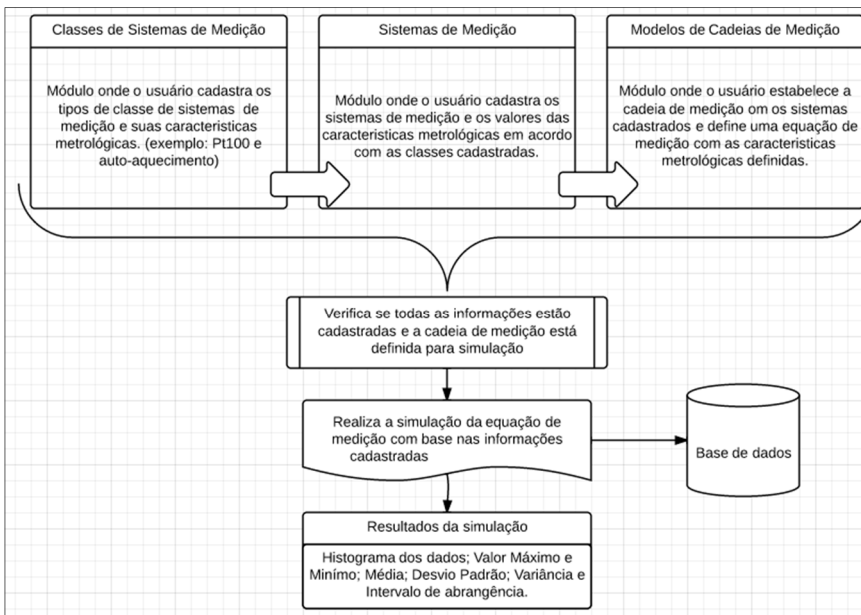


Figura 13 – Estrutura do ambiente e fluxo de informações

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1 Cadastro de classe de sistemas de medição

Nessa área do ambiente de simulação é possível cadastrar diferentes classes de sistemas de medição. Para cada classe devem ser cadastradas as informações referentes aos parâmetros ou características metrológicas, conforme apresentado no capítulo 3, tais como estabilidade, resolução, precisão, repetibilidade, etc.

Como exemplo pode-se citar o transdutor de temperatura do tipo termorresistência (Pt100), que apresenta as seguintes características metrológicas: sensibilidade, tendência, auto-aquecimento e ruído térmico [Barp, 2000].

A figura 14 apresenta a tela do ambiente de simulação para o cadastro das classes de sistemas de medição e suas respectivas características metrológicas consideradas.

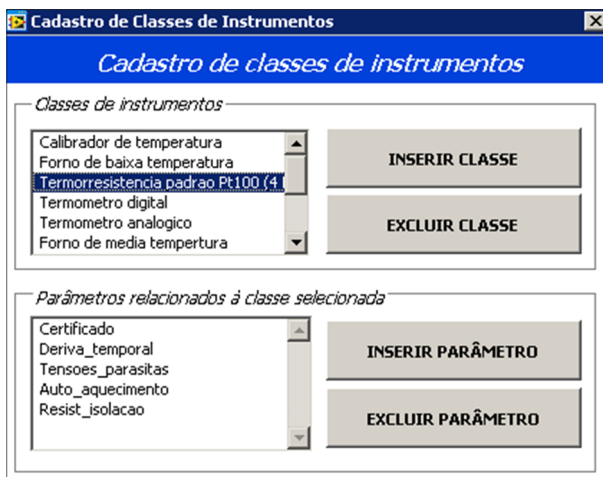


Figura 14 – Tela de cadastro de classes de sistemas de medição

4.2.2 Cadastro de sistemas de medição

Nessa área do ambiente de simulação, após o cadastro da classe de um sistema de medição, é possível realizar o cadastro de um sistema de medição e os respectivos valores para as características metrológicas definidas para aquela classe.

Os valores das características metrológicas devem ser cadastrados para cada sistema de medição, podendo ser em valor absoluto ou em porcentagem da faixa de indicação. Os valores das características metrológicas dos sistemas de medição são representados por uma distribuição de probabilidade.

A figura 15 apresenta a tela de cadastro de sistemas de medição e as informações referentes às características metrológicas e suas respectivas distribuições de probabilidade. É possível verificar o Pt100 cadastrado e as informações. É possível verificar as informações cadastradas para um sensor de temperatura Pt100 e suas respectivas características metrológicas.

Cadastro de Instrumentos

Cadastro de sistemas de medição

Cadastro de sistema de medição

Classe	Nome	Descrição	Lim. Inf. FM	Lim. Sup. FM	Número de Série
Termometro digital	TD-001	Termometro digital	0	100	NC
Calibrador de temp	PTT-0075	Calibrador CAPPO Plus	-200	850	NC
Termorresistencia	PTT-0081	Termorresistencia Pt100 4 fios	-50	298	NC
Forno de baixa ten	PTT-0083	Forno ECIL BT	-25	140	BT940/0913
Termometro analo	TA-001	Termometro analogico	0	300	NC
Multimetro digital	PTE-000X	Multimetro digital - Resistência 4 fios	0	200	NC
Massa Padrão	Massa Padrão	Massa 10kg	10	10	NC

INSERIR

EDITAR

EXCLUIR

Parâmetros do sistema de medição selecionado

Parâmetro	Depende da FM?	Distribuição	a	b	Graus de liberdade	Divisor
Certificado	0	Normal	0	0,02	17	2,17
Deriva temporal	0	Retangular	-0,02	0,02	0	0
Tensores parasitas	0	Retangular	-0,02	0,02	0	0
Auto aquecimento	0	Retangular	-0,0016	0,0016	0	0
Resist_isolacao	0	Retangular	-0,002	0,002	0	0

INSERIR

EDITAR

EXCLUIR

Legenda:

- Distrib. Uniforme e Triangular

a = Limite inferior

b = Limite superior

- Distrib. Normal

a = Média

b = Desvio padrão

Figura 15 – Tela de cadastro de sistemas de medição

4.2.3 Cadastro de modelos de cadeias de medição

Nessa área do ambiente de simulação deve ser definido um modelo de cadeia de medição para um determinado processo de calibração. A composição de diferentes classes de sistemas de medição possibilita a formação de diferentes cadeias de medição para uma mesma grandeza.

Nessa área ainda é possível definir uma equação de medição para um determinado modelo de cadeia de medição cadastrado. Com as características metrológicas definidas para cada classe e com a cadeia de medição definida, é possível utilizar essas informações para definir a equação de medição que será utilizada para a simulação da incerteza de medição através do método de Monte Carlo.

A figura 16 apresenta a tela para o cadastro de modelos de cadeias de medição e a definição de sua respectiva equação. Uma grandeza deve ser definida para cada modelo de cadeia de medição cadastrado.

Cadastro de Modelos de Cadeias

Cadastro de modelos de cadeias de medição

Grandeza : Temperatura

- Calib indireta de termometro digital - Calibrador
- Calib direta de termometro analogico
- Calib direta de termometro digital
- Calib indireta de termometro digital - Multimetrol

INSERIR

EDITAR

EXCLUIR

Classes de instrumentos e parâmetros da cadeia selecionada

Associar : Termometro digital

- Calibrador de temperatura
 - Certificado
 - Resolucao
 - Deriva_temporal
 - Repetibilidade

CADASTRO DE CLASSES

EXCLUIR

INSERIR NA EQUAÇÃO

Equação de Medição

{100+{Termometro digital.Resolucao}}-{100+{Calibrador de temperatura.Certificado} + {Calibrador de temperatura.Resolucao} + {Calibrador de temperatura.Deriva_temporal} + {Forno de baixa temperatura.Uniformidade} + {Forno de baixa temperatura.Estabilidade} + {Termopar de temperatura 0 a 100 (4 fios).Certificado} + {Termopar de temperatura 0 a 100 (4 fios).Resolucao}}

APLICAR FÓRMULA

DESFAZER EDIÇÃO

Figura 16 – Tela de cadastro de modelos de cadeias de medição

4.2.4 Resultados da simulação de um processo de calibração

Uma das informações obtida na calibração é a tendência instrumental do sistema de medição e a incerteza expandida de medição associada à tendência instrumental. A incerteza expandida de medição associada à tendência obtida em uma calibração define um intervalo de abrangência, com uma determinada probabilidade de abrangência, em que o valor da tendência instrumental está contido.

No ambiente proposto o resultado da incerteza de medição associada ao resultado da calibração é representado como um intervalo de abrangência. O intervalo de abrangência (IA) ou intervalo de

abrangência simulado através do método de Monte Carlo, representa essa incerteza expandida associada ao resultado, definida como “grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição a qual se espera abranger uma grande fração da distribuição de valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando” [INMETRO, 2012].

Para o cálculo do intervalo de abrangência no ambiente de simulação foi adotado o recurso de ordenar o vetor de saída, que contém todos os resultados obtidos com a simulação, do menor para o maior valor e identificar os limites do IC por meio da contagem dos seus elementos. Assim, por exemplo, supondo que o número de simulações $M = 100000$ e $p = 95\%$, os limites de um intervalo de abrangência simétrico são estimados pelos valores dos elementos número 2.500 e 97.500 do vetor ordenado.

A utilização do método de ordenação e contagem do vetor de saída bons resultados quando a distribuição dos resultados é simétrica. No caso de uma distribuição de saída ser assimétrica é recomendado à utilização de outros métodos para a avaliação do intervalo de abrangência.

A figura 17 apresenta a tela onde são apresentados os resultados de uma simulação. São apresentados os limites para o intervalo de abrangência, o histograma dos dados com a forma da distribuição de probabilidade do resultado e os valores de média, máximo, mínimo, desvio padrão e variância.

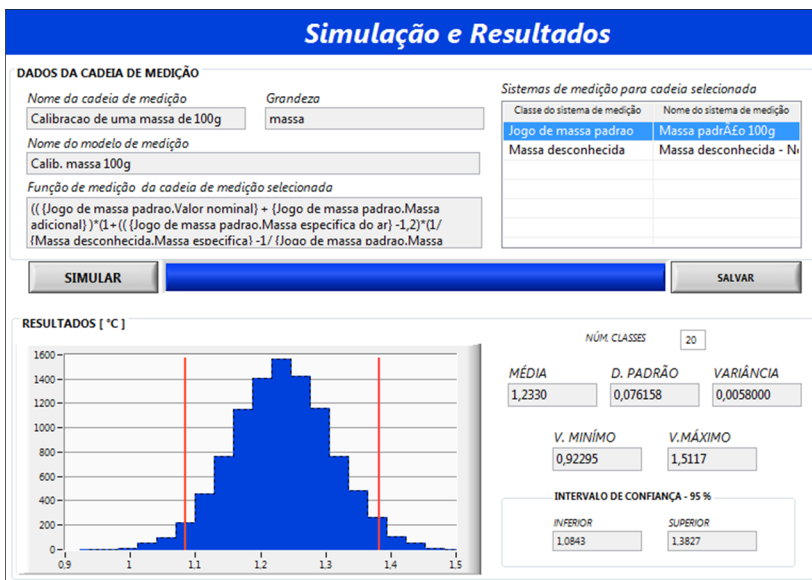


Figura 17 – Tela de simulação e resultados

4.3 ESTRUTURA DO BANCO DE DADOS

O banco de dados desenvolvido é do tipo relacional, sendo definida a relação entre as tabelas de dados através da identificação de chaves primárias. A estrutura do banco de dados desenvolvido é apresentada na figura 18.

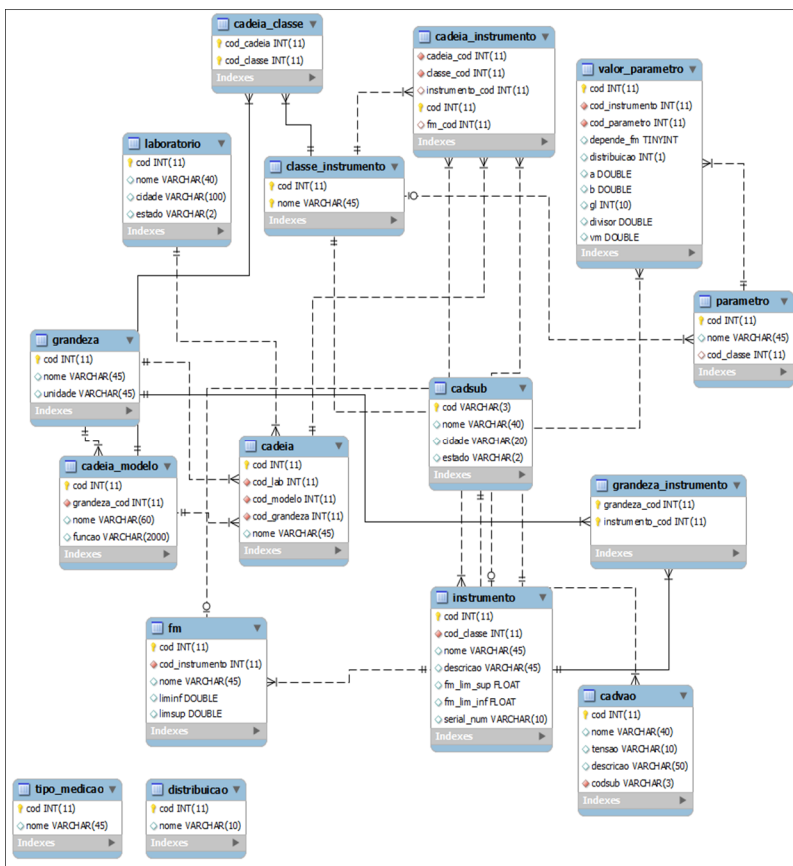


Figura 18 - Estrutura do banco de dados

Para o desenvolvimento do banco de dados foi utilizado o programa MySQL. O sistema MySQL é um servidor de banco de dados SQL que atendia plenamente as necessidades do ambiente de simulação proposto.

O programa MySQL foi escolhido devido a facilidade de uso e total integração com o programa LABVIEW da National Instruments. O capítulo 5 apresenta mais informações sobre o MySQL e sua integração com o LABVIEW.

5 DESENVOLVIMENTO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

5.1 PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Com a definição dos requisitos que o ambiente de simulação deve atender, um planejamento foi estabelecido para o desenvolvimento do ambiente de simulação e sua base de dados, bem como dos testes das funcionalidades propostas, conforme capítulo 4. Para o desenvolvimento do ambiente de simulação foram determinadas as seguintes etapas:

- a) avaliação dos métodos de avaliação de incerteza de medição e a definição de um método a ser implantado no ambiente de simulação;
- b) avaliação e seleção de tecnologias e ferramentas para programação e estruturação de um banco de dados;
- c) definição das informações a serem cadastradas no banco de dados para a realização da simulação;
- d) estruturação do banco de dados com a tecnologia selecionada;
- e) testes de funcionalidade do banco de dados com as ferramentas da tecnologia selecionada;
- f) desenvolvimento do ambiente de simulação com a tecnologia selecionada;
- g) testes de funcionalidade do ambiente de simulação com as ferramentas da tecnologia selecionada;
- h) testes de funcionalidade do método de simulação de Monte Carlo;
- i) integração do ambiente de simulação ao banco de dados;
- j) testes de funcionalidade do banco de dados através do ambiente de simulação;
- k) teste de funcionalidade do ambiente com informações do banco de dados;
- l) avaliação da estabilidade e variabilidade do sistema de simulação;
- m) testes finais através de cadastros de informações já conhecidas e implementação de um processo de calibração real.

Com o planejamento definido e os objetivos do ambiente de simulação bem determinados, o processo de desenvolvimento do ambiente ocorreu em quatro etapas:

- a) desenvolvimento do banco de dados;
- b) desenvolvimento do ambiente de simulação de Monte Carlo;

- c) integração entre o banco de dados a simulação de Monte Carlo.
- d) testes de funcionamento do ambiente de simulação com cadastro de processos de calibrações reais

A ferramenta utilizada para o desenvolvimento do banco de dados foi o programa MySQL, que possui diversas funcionalidades para gerenciamento do banco de dados, além de ser uma ferramenta gratuita com total interação com a linguagem de programação LABVIEW utilizada no desenvolvimento do ambiente de simulação.

O LABVIEW é uma linguagem gráfica de programação, muito utilizada para o desenvolvimento de simuladores e na automatização de processos de medição, que utiliza a programação através de ícones ao invés de linhas de texto [Flesch, 2001]. Possui diversas ferramentas para integração com outros sistemas, através de diferentes protocolos de comunicação, bem como ferramentas para conexões com servidores e banco de dados.

5.2 RECURSOS DE SOFTWARE

5.2.1 LABVIEW

A linguagem LABVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), da National Instruments, é uma ferramenta de desenvolvimento que permite a aquisição de dados, análise, simulação ou controle de sistemas e processos de medição ou automação. Também permite o controle via web de sistemas e processos, além da criação de arquivos executáveis para serem utilizados em computadores que não possuem o software instalado.

O LABVIEW usa uma linguagem de programação chamada G. Essa linguagem possui diretiva como PASCAL e C, mas ao invés de utilizar comandos na forma de texto para gerar as linhas de código, usa uma linguagem de programação gráfica, ou seja, o programa é feito na forma de um diagrama de blocos.

Utilizando uma estrutura de programação hierárquica e orientada pelo fluxo de dados, o LABVIEW torna simples a implementação de sistemas complexos que englobem aquisição e manipulação de dados ou ainda o controle de equipamentos através do computador.

o LABVIEW inclui diversas bibliotecas compostas por componentes contendo funções para aplicações específicas (algoritmos de análise estatística, processamento e geração de sinais etc.).

5.2.2 Servidor de dados MySQL

O programa MySQL é um servidor robusto de bancos de dados SQL (*Structured Query Language* – Linguagem Estruturada para Pesquisas) muito rápido, multitarefa e multiusuário. O Servidor MySQL pode ser usado em sistemas de produção com alta carga e missão crítica, bem como pode ser embutido em programa de uso em massa. MySQL é uma marca registrada da MySQL AB.

O MySQL é um sistema de gerenciamento de bancos de dados. Um banco de dados é uma coleção de dados estruturados. Ele pode ser qualquer coisa desde uma simples lista de compras a uma galeria de imagens ou uma grande quantidade de informação da sua rede corporativa. Para adicionar, acessar, e processar dados armazenados em um banco de dados de um computador é necessário um sistema de gerenciamento de bancos de dados como o Servidor MySQL.

Como os computadores são muito bons em lidar com grandes quantidades de dados, o gerenciamento de bancos de dados funciona como a engrenagem central na computação, seja como utilitários independentes ou como partes de outras aplicações.

O MySQL também é um sistema de gerenciamento de bancos de dados relacional. Um banco de dados relacional armazena dados em tabelas separadas em vez de colocar todos os dados um só local. Isso proporciona velocidade e flexibilidade. A parte SQL do “MySQL” atende pela “*Structured Query Language* – Linguagem Estrutural de Consultas”.

SQL é a linguagem mais comum usada para acessar banco de dados e é definida pelo padrão ANSI/ISO SQL. A linguagem SQL vem evoluindo constantemente e atualmente existem diversas versões, possibilitando a escolha de acordo com a aplicação.

O servidor MySQL foi desenvolvido originalmente para lidar com bancos de dados muito grandes de maneira muito mais rápida que as soluções existentes no mercado no final da década de 80 e tem sido usado em ambientes de produção de alta demanda de maneira bem sucedida. Conectividade, velocidade, e segurança fazem com que o MySQL seja altamente adaptável para acessar bancos de dados na Internet.

5.2.3 MySQL Connector/ODBC

O conector ODBC (*Open Database Connectivity*) é o nome de uma família de *drivers* ODBC MySQL que fornece acesso para os banco de dados elaborados em MySQL usando o padrão industrial para *Open Database Connectivity*, conhecido como API (*Application-Programming Interface*).

ODBC fornece uma maneira de acesso de programas clientes a uma vasta gama de banco de dados ou fontes de dados. ODBC é uma forma padronizada, com padrão API, que permite conexões com servidores de dados SQL.

Ele foi desenvolvido em acordo com as especificações do Grupo de Acesso SQL e define um conjunto de funções de chamada, códigos de erros, e tipos de dados que podem ser utilizados para o desenvolvimento de aplicativos de banco de dados independentes. ODBC é frequentemente utilizado quando a independência do banco de dados ou acessos simultâneos a diferentes fontes de dados é necessária.

Open Database Connectivity é uma API amplamente aceita e utilizada para o acesso a bando de dados. Ele é baseado nas especificações da *Call-Level Interface* (CLI) da X/Open e ISO/IEC para bancos de dados API e utiliza servidores SQL e sua linguagem de acesso ao banco de dados [SUN MICROSYSTEMS, 2009].

5.2.4 Database Connectivity Toolset

O LABVIEW *Database Connectivity Toolset* é um pacote de aplicativo para acesso a banco de dados. O aplicativo possui uma gama de funções de alto nível para realizar as tarefas mais comuns e funções avançadas para realizar tarefas personalizadas.

O LABVIEW *Database Connectivity Toolset* fornece possibilidade de acesso aos mais populares tipos de banco de dados e sistema de alto desempenho para o gerenciamento de banco de dados relacional, RDBMS (*Relational Database Management System*) que funciona em uma variedade de computadores e sistemas operacionais.

Através de programas de aplicação específica, os usuários podem conectar-se ao banco de dados, criar e armazenar registros, modificar e recuperar informações, classificar e gerenciar dados em bancos de dados locais ou em rede. Os comandos são expressos em *Structured Query Language* (SQL) para a realização das funções [NATIONAL INSTRUMENTS, 2009]. A figura 19 apresenta o as funções disponíveis no aplicativo *Database Connectivity Toolset* do LABVIEW.

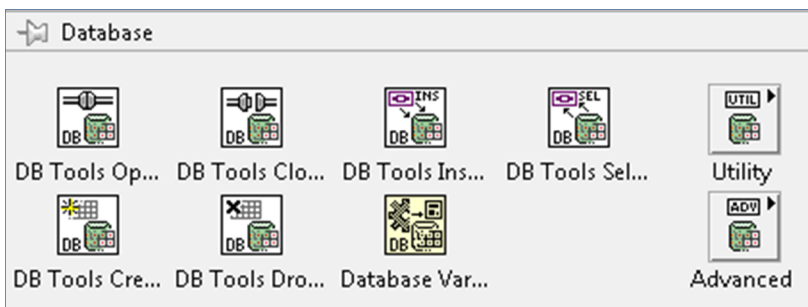


Figura 19 – LABVIEW *Database Connectivity Toolset*.
 Fonte: LABVIEW, 2009.

6 AVALIAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

6.1 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O método de SMC apresenta algumas restrições e cuidados para garantir a qualidade dos dados obtidos. No capítulo 2 foram apresentados os aspectos relevantes para garantir a qualidade dos resultados quando utilizado o método de simulação de Monte Carlo. Uma avaliação do número de iterações foi realizada de forma a verificar o número de iterações recomendado para a realização da simulação. A escolha inadequada do número de iterações pode afetar a confiabilidade dos resultados gerados.

Para avaliar a SMC desenvolvida no ambiente de simulação e definir um número de iterações mínimo recomendado, um teste foi realizado com uma equação de medição muito simples, $Y = X_1 + X_2$, de forma a comparar os resultados obtidos por Souza e Ribeiro, 2006.

As variáveis de entrada X_1 e X_2 possuem distribuição de probabilidade uniforme com limites $[0,1]$. A variável Y deve apresentar uma distribuição triangular com limites $[0,2]$.

A figura 20 apresenta o resultado apresentado por Souza e Ribeiro em suas simulações. A figura 21 apresenta o resultado obtido pelo ambiente de simulação proposto para a mesma equação.

A análise do número de iterações M recomendado e da estabilidade do sistema, foi realizada através da geração de 5 diferentes números de iterações em ordem de grandezas distintos. Foram avaliados os resultados da média, desvio padrão, o intervalo de abrangência e o tempo de simulação conforme tabela 2. Também foram realizadas 10 simulações para 3 valores de M , com o objetivo de avaliar a influência da número de iterações M na variabilidade do sistema, os resultados obtidos são apresentados na tabela 3.

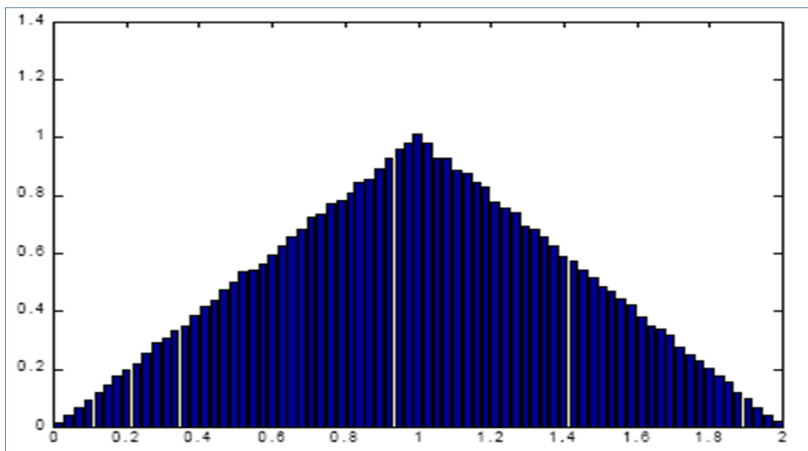


Figura 20 - Distribuição de probabilidade para a equação $Y = X_1 + X_2$
 Fonte: Souza e Ribeiro, 2009.

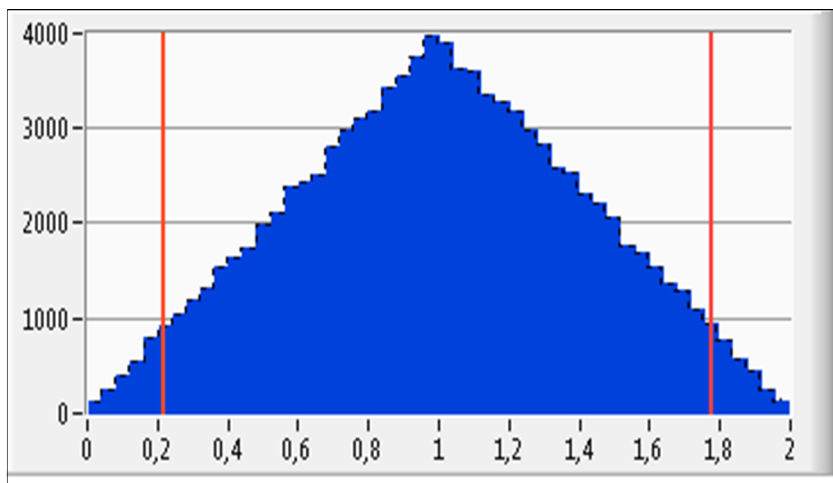


Figura 21 – Distribuição de probabilidade para a equação $Y = X_1 + X_2$, obtida no ambiente de simulação.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Resultados de simulação obtidos para diferentes valores de M , para a função $Y = X_1 + X_2$

M	Média	D. Padrão	IC (95%)	Tempo (s)
100	1,04	0,41	1,65	--
1000	1,01	0,42	1,60	1
5000	1,00	0,40	1,56	3
10000	1,00	0,41	1,55	5
10^5	1,00	0,41	1,55	45

Tabela 3 - Resultados de 10 simulações obtidos para diferentes valores de M , para a função $Y = X_1 + X_2$

	Valores de M					
	500		5000		$0,5 \times 10^5$	
	M	DP	M	DP	M	DP
1	0,98	0,42	1,00	0,41	1,00	0,41
2	0,99	0,41	1,00	0,41	1,00	0,41
3	1,03	0,42	1,00	0,40	1,00	0,41
4	1,00	0,40	1,00	0,40	1,00	0,41
5	0,99	0,44	0,99	0,41	1,00	0,41
6	1,03	0,41	1,00	0,41	1,00	0,41
7	1,00	0,42	0,99	0,41	1,00	0,41
8	1,03	0,41	1,00	0,41	1,00	0,41
9	1,01	0,42	1,00	0,41	1,00	0,41
10	1,02	0,42	1,00	0,41	1,00	0,41
M	1,008	0,417	0,998	0,408	1,00	0,41
DP10	0,018	0,010	0,004	0,004	0,000	0,000

Legenda:

M – média obtida no ambiente de simulação

DP – desvio padrão obtido no ambiente de simulação

DP10 – desvio padrão das 10 simulações realizadas

Conforme esperado o aumento do número de iterações promove resultados melhores e mais estáveis. Pode-se observar na tabela 3 que não houve grandes mudanças nos resultados em valores de $M > 10^5$, entretanto o tempo para simulação aumenta de forma considerável. Desse modo um número de iterações M em ordem de grandeza de 10^5 já pode ser considerado aceitável para a obtenção dos resultados.

Na tabela 2 pode-se observar a variabilidade do sistema em relação ao número de iterações. Verifica-se que conforme o número de iterações M aumenta a variabilidade dos resultados diminui, enfatizando a necessidade da utilização de um número de iterações suficientes para que o sistema não inclua outras fontes de variações ou incertezas além dos parâmetros da equação de medição.

A figura 22 apresenta a variação dos resultados da média de 10 simulações conforme varia o número de iterações, em acordo com o apresentado na tabela 3. A variação dos resultados obtidos é reduzida com o aumento no número de iterações. Também foi realizada uma análise do impacto do número de iterações no resultado simulado com o estudo de caso proposto no item 6.2.1.

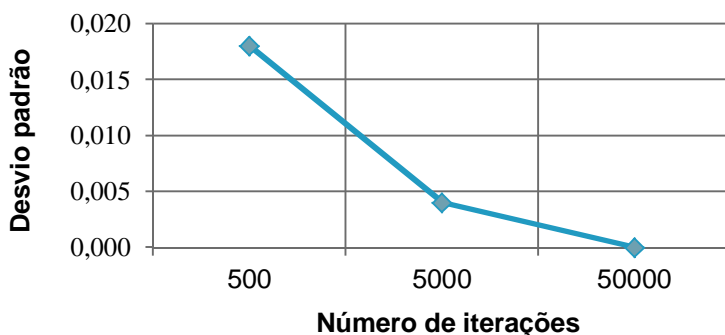


Figura 22 – Gráfico Número de iterações x Desvio padrão dos resultados simulados

6.2 SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

A medição de temperatura possui destaque na indústria, tendo influência marcante em diversos processos industriais. O mercado mundial das indústrias produtoras de sistemas para medição de temperatura está avaliado em 1,3 bilhão de dólares, com um crescimento anual acima de 9% [Barp, 2000].

Com objetivo de avaliar a aplicabilidade do ambiente de simulação proposto, uma análise de um processo de calibração de um medidor de temperatura digital pelo método de calibração indireta. Essa calibração é facilmente encontrada em laboratórios da área de temperatura.

O medidor de temperatura digital, ou termômetro digital, é um sistema de medição que pode ser facilmente encontrado na indústria. A calibração de um medidor de temperatura digital pode ser realizada através do método de calibração indireta ou calibração direta. No processo avaliado foi utilizado o método de calibração indireta.

Na calibração indireta é utilizado um medidor de temperatura padrão como referência, o padrão e o sistema de medição em calibração realizam a medição do mesmo mensurando. Na calibração direta o mensurando é definido pelo padrão, como exemplo uma célula de ponto fixo, sendo medido pelo sistema de medição em calibração.

6.2.1 Análise do processo de calibração

Um medidor digital de temperatura ou termômetro digital é usualmente calibrado com uma termorresistência padrão e um indicador padrão (medidor de temperatura padrão). O valor do mensurando é obtido através da utilização de um dispositivo auxiliar, um gerador de calor ou forno.

A figura 23 apresenta o método de calibração indireto para um termômetro digital, usando como referência um medidor de temperatura padrão, que é formado por uma termorresistência com ligação a 4 fios e um calibrador digital de temperatura. A temperatura é gerada pelo dispositivo auxiliar (forno) e medida pelo termômetro em calibração e pelo medidor de temperatura padrão.

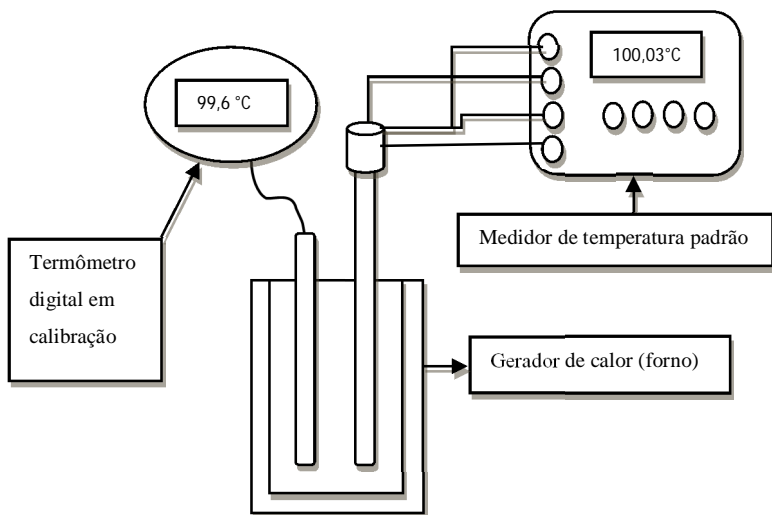


Figura 23 – Modelo de calibração indireta de um termômetro digital

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a leitura da resistência elétrica do termorresistência padrão um calibrador de temperatura padrão é utilizado. O calibrador já realiza a conversão do valor de resistência elétrica para temperatura em acordo com as equações da ITS 90, facilitando a leitura do resultado [ECIL TEMPERATURA, 2010].

A ITS (*International Temperature Scale*) 90 é uma norma internacional que apresenta informações sobre os polinômios de termopares e termorresistências. O calibrador digital utiliza os coeficientes dos polinômios apresentados nessa norma para converter o sinal obtido pela termorresistência padrão em ohms em um resultado em graus Celsius.

Para a análise do processo de calibração foi definida uma cadeia de medição, que representa o sistema de medição padrão utilizado e o dispositivo auxiliar necessário para gerar o mensurando. A figura 24 apresenta o modelo de cadeia de medição que representa o sistema de medição padrão para determinar do valor de referência, utilizado para a obtenção do erro no processo de calibração.

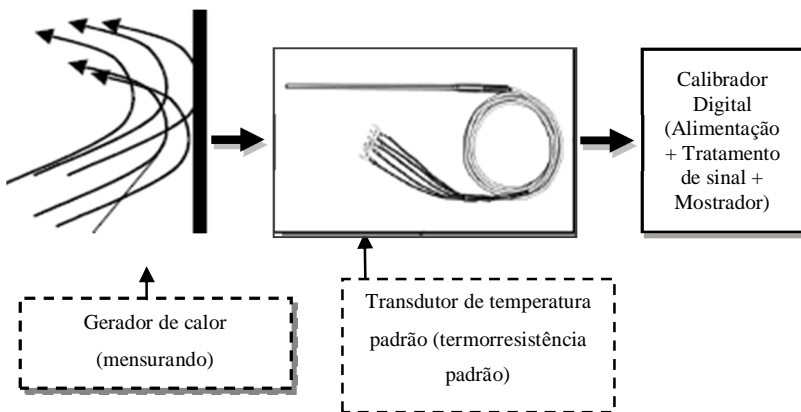


Figura 24 – Cadeia de medição para o processo de calibração proposto para determinação do valor de referência

Fonte: Barp, 2000

Para avaliar a incerteza do processo de calibração proposto foi realizada uma análise em cada módulo da cadeia de medição. Foram analisados os parâmetros e especificações de fabricantes bem como os efeitos dos cabos e conexões.

Como forma de avaliar uma aplicação prática do ambiente de simulação foram utilizados dados referentes a padrões e dispositivos auxiliares utilizados pelo laboratório ACC PR Soluções em Instrumentação, Qualidade e Metrologia LTDA localizado em São José dos Pinhais-PR. O laboratório ACC PR se dispôs a servir como estudo de caso e disponibilizou acesso aos documentos técnicos, equipamentos e estrutura.

Foi realizado a análise nos processos de calibração de temperatura e os padrões utilizados para essa área. Uma avaliação dos parâmetros e informações técnicas dos padrões e dispositivos auxiliares envolvidos foi realizada e foram definidas algumas condições de contorno para a calibração: temperatura ambiente de $(25 \pm 3)^{\circ}\text{C}$, profundidade de imersão da termorresistência padrão de 140 mm e ponto de calibração 100°C .

6.2.1.1 Termorresistência padrão

A termorresistência padrão utilizada foi um modelo do tipo Pt100, com ligação 4 fios e identificação PTT-0081, calibrado em laboratório acreditado junto RBC/CGCRE do INMETRO, sob certificado número 4028/2012. A calibração foi realizada em 30/05/2012 nos pontos de calibração de -50°C, 50°C, 100°C, 200 °C e 298,12 °C. Também é apresentada no certificado, para o ponto de 100°C, uma tendência instrumental de 0,04°C e uma incerteza expandida de $\pm 0,04$ °C para um fator de abrangência $k = 2,17$ e uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

O fabricante da termorresistência padrão utilizada é a ECIL Temperatura Industrial. Em busca no site do fabricante, poucas informações sobre as características metrológicas foram encontradas.

As principais fontes de incerteza em termorresistências são: erro máximo admissível, auto-aquecimento, influência do fio, resistência de isolamento, deriva com o tempo e ruído [Barp, 2000].

a) Erro máximo admissível

Como no termopar, a termorresistência apresenta valores que definem os erros máximos admissíveis entre os valores nominais do transdutor após fabricação. Esses desvios são definidos por norma ou pelo fabricante do componente. A norma IEC 751 define duas classes de tolerância para termorresistências: A e B. Alguns fabricantes também propõem extensões dessas classes conforme tabela 4 [Barp, 2000].

Tabela 4 – Classes de tolerância para termorresistências

Referência	Descrição	Faixa de medição	Erro Máximo Tolerado*
IEC	Classe A	(-200 a +650) °C	$\pm (0,15 + 0,002 \times T)$
IEC	Classe B	(-200 a +850) °C	$\pm (0,30 + 0,005 \times T)$
Fabricante	1/3 Classe B	(0 a 200) °C	$\pm (0,10 + 0,005 \times T)$
Fabricante	2 Classe B	(0 a 200) °C	$\pm (0,60 + 0,005 \times T)$
Fabricante	0,5	(-200 a +850) °C	$\pm (0,50 + 0,008 \times T)$

Fonte: Barp, 2000

Nota: (*) O erro máximo tolerado é apresentado em função da temperatura medida (T)

A tendência instrumental apresentada no certificado de calibração da termorresistência no ponto de 0 °C foi de + 0,18 °C com uma incerteza expandida da tendência de $\pm 0,03$ °C e fator de abrangência de 2,00 para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Para a simulação do processo de calibração foi considerado como fonte de incerteza os resultados obtidos na calibração da termorresistência padrão e não o erro máximo tolerado devido ao maior número de informações contidas no certificado de calibração.

b) Auto-aquecimento

A termorresistência necessita ser excitada para que se possa determinar o valor da sua resistência. Esse procedimento, geralmente realizado através da passagem de uma corrente elétrica, que faz com que o transdutor aqueça (efeito Joule), causando um erro no valor da temperatura. O aumento da temperatura depende da capacidade de dissipação do transdutor, relacionando-se com a corrente de acordo com a equação 6 [Barp, 2000].

$$\Delta T_{aq} = \frac{R \cdot I^2}{\delta} \quad (6)$$

Onde:

ΔT_{aq} , diferença de temperatura devido ao auto – aquecimento [°C];

R, resistência do resistor para a temperatura a ser medida [Ω];

I, corrente de excitação do termorresistência [A];

δ , coeficiente de dissipação do transdutor (auto – aquecimento) [W/K].

O coeficiente de auto-aquecimento depende do contato térmico existente entre a termorresistência, o material utilizado para proteção e o meio em que o transdutor será empregado (tipo de fluido e velocidade). Fabricantes apresentam os coeficientes de acordo com uma determinada condição (água em movimento ou ar) e para uma determinada aplicação.

O manual do calibrador digital padrão especifica uma corrente de excitação para medição de termorresistência de 0,9 mA. Não foi encontrada informação sobre o coeficiente de dissipação para a termorresistência padrão da ECIL. Foi adotado o valor de 50 mW/K, valor estimado com base em informação de outro fabricante [FLUKE CORPORATION, 2010].

Para uma termorresistência do tipo Pt100 o valor da resistência no ponto de medição de 0 °C é 100 ohms. O valor de variação de temperatura devido ao auto-aquecimento é uma fonte de incerteza, sendo considerada uma distribuição de probabilidade uniforme. A equação 7 apresenta o valor da variação de temperatura devido ao auto – aquecimento.

$$\Delta T_{aq} = \frac{100 \cdot 0,0009^2}{0,050} = 0,0016 \text{ } ^\circ \text{C} \quad (7)$$

c) Influência do fio

Por causa da baixa sensibilidade da termorresistência, a variação da resistência dos fios de ligação pode provocar erros consideráveis no valor de temperatura. A influência é modelada como resistências equivalentes em série com o transdutor. Essa resistência é dependente do diâmetro do fio, do comprimento e da temperatura a ele exposta [65].

O erro causado pelo fio depende do tipo de circuito utilizado para medir. Para reduzir o efeito da influência do fio é utilizado o método de ligação a 4 fios. Esse método de ligação praticamente elimina o efeito de influência do fio. Desse modo não foi considerada nenhuma fonte de incerteza devido à influência do fio.

d) Resistência de isolamento

Dependendo do tipo de material de isolamento utilizado para proteger a termorresistência, pode haver um decréscimo de sua resistência equivalente devido ao aumento da temperatura, causando uma diminuição na resistência medida. Essa influência pode ser modelada como uma resistência colocada em paralelo com a resistência da termorresistência.

Para o caso de termorresistências de platina ($R/T = 0,385 \text{ } \Omega/\text{K}$) isolados com óxido de manganês, em baixas temperaturas a resistência de isolamento atinge valores superiores a 100 M Ω , ocasionando erros inferiores a 0,002 °C. Entretanto, quando a temperatura atinge valores próximos de 600 °C, a resistência se reduz para 100 k Ω e o erro pode atingir o valor de 25 °C [Barp, 2000].

O valor da resistência de isolamento é informado em catálogos de alguns fabricantes ou pode ser medido através de megômetros. Não foi

encontrados valores de resistência de isolamento para a termorresistência padrão ECIL, sendo estimado um erro de 0,002 °C conforme referência [Barp, 2000], sendo considerada uma distribuição de probabilidade uniforme devido à ausência de maiores informações.

e) Deriva com o tempo

A termorresistência é o transdutor de temperatura com melhor estabilidade em longo prazo. A deriva com o tempo ocorre devido ao tipo de fabricação e às condições do ambiente de utilização e são de natureza química e física.

As modificações físicas ocorrem devido ao processo de fabricação, a choques mecânicos e térmicos, à expansão térmica do fio de platina e a vibrações durante o processo de medição. Essas influências podem ser reduzidas através de instalação e manejo adequado.

As modificações químicas ocorrem devido às reações envolvendo a platina e as impurezas existentes no material, da proteção ou do substrato. Essas influências começam a ter importância em temperaturas mais elevadas (superiores a 500 °C).

A tabela 5 exemplifica a diversidade de valores de desvio encontrados em características de resposta. Entretanto pode-se notar que quanto maior a temperatura, maior é o desvio. Também se identifica que as termorresistências com encapsulamento de vidro ou tipo filme têm uma estabilidade menor que o termorresistência industrial (fio enrolado com tubo protetor) [Barp, 2000].

Tabela 5 – Derivas com o tempo encontradas em termorresistências de platina

Tipo	Tempo	Temperaturas	Deriva
Industrial	1 ano	540 °C	0,25 K
Industrial	6000 horas	850 °C	1 K
Industrial	6000 horas	(-20 a +250) °C	< 0,02 K
Industrial	10 ciclos	(-20 a +600) °C	< 0,05 K
Filme	10 ciclos	(-20 a +600) °C	0,3 K
Vidro	10 ciclos	(-196 a +300) °C	0,1 K

Fonte: Barp, 2000

Não foram encontradas informações do fabricante sobre a deriva temporal da termorresistência de platina padrão. Com as informações

sobre o uso do padrão pelo laboratório e com base nas referências foi adotado um valor de deriva de 0,02 °C e uma distribuição de probabilidade uniforme.

f) Ruído

As termorresistências são afetadas pelo ruído térmico. O ruído térmico, conhecido também como ruído Johnson, é causado pela agitação (movimento aleatório) dos elétrons em decorrência da temperatura. A equação 8 relaciona as principais variáveis que influenciam a tensão gerada pelo fenômeno [Barp, 2000]:

$$V_t = \sqrt{4kRT\Delta f} \quad (8)$$

Onde:

$k = 1,38 \times 10^{-23}$, é a constante de Boltzmann [J/K];

R , é o valor da resistência [Ω];

T , é o valor da temperatura [K];

Δf , banda de frequência [Hz].

Devido à relação linear entre a potência do ruído e sua banda de frequência, o ruído térmico é também chamado de ruído branco. Através da equação 8 pode-se concluir que quanto maior a resistência, maior a quantidade de ruído gerado pela termorresistência e que diminuindo a banda de frequência do resistor (através de filtros), reduz-se o ruído aplicado ao sistema.

Devido à baixa frequência e do valor da resistência gerada pela termorresistência o ruído gerado é muito pequeno e pode ser considerado irrelevante em comparação com demais fontes de incerteza, desse modo não foi determinado nenhum valor de incerteza padrão para o ruído.

6.2.1.2 Calibrador digital padrão

Para a leitura da termorresistência padrão foi utilizado um calibrador digital de temperatura, modelo CAPPO 10, fabricante ECIL e identificação PTT-0075. O padrão foi calibrado por um laboratório pertencente à RBC/CGCRE, sob certificado número 5984-13 Rev01.

Uma pesquisa nas especificações técnicas do manual e no site do fabricante foi realizada e poucas informações sobre as características

metrológicas são apresentadas, o que dificulta uma avaliação das fontes de incerteza. As seguintes fontes de incertezas foram consideradas: certificado de calibração, resolução do calibrador e deriva com o tempo.

a) Certificado de calibração

O certificado de calibração apresenta, para o ponto de calibração de 100°C e no modo de leitura de termorresistência, uma tendência instrumental de 0,0 °C e uma incerteza expandida associada de $\pm 0,1$ °C para um fator de abrangência de 2,11, um nível de confiança de aproximadamente 95% e 23 graus de liberdade efetivos.

b) Resolução

Em acordo com o manual do fabricante o calibrador para o modo de leitura de termorresistência a 4 fios apresenta uma resolução de 0,1 °C em um mostrador digital. A resolução do calibrador foi considerada como uma distribuição de probabilidade uniforme.

Foi considerado na simulação o valor de metade do incremento digital do mostrador digital do calibrador correspondente ao valor de 0,05°C.

c) Deriva com o tempo

O manual do fabricante apresenta uma informação de exatidão, que foi entendida como erro máximo do calibrador. Os valores apresentados de exatidão correspondem a um período de um ano. Em consulta ao laboratório foi informado que o calibrador tem cerca de 3 anos de uso.

É especificado um valor anual de $\pm 0,1$ °C para o modo de leitura de termorresistência a 4 fios. Assim, para o período de 3 anos o valor da deriva com o tempo é de $\pm 0,3$ °C. Devido à ausência de informações mais detalhadas sobre a distribuição desse valor foi adotada uma distribuição de probabilidade uniforme.

6.2.1.3 Gerador de calor (forno)

No processo de calibração proposto, o mensurando é gerado através de um forno (gerador de calor) de fabricante ECIL, modelo BT, sendo que a temperatura gerada pelo forno deve ser medida pelo sistema de medição em calibração e pelo sistema de medição padrão.

O gerador de calor possui identificação PTT-0083 e foi calibrado em um laboratório acreditado, sob certificado número 6642/2013. A calibração do forno foi realizada como um termômetro digital, sendo obtida uma tendência instrumental, no ponto de 100°C, de 0,0°C e uma incerteza expandida de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ com fator de abrangência $k=2,00$ e uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A norma ABNT NBR 13772:1997 Termorresistência – Calibração por comparação com termorresistência de referência define que os meios térmicos utilizados devem proporcionar, da melhor maneira possível, uma uniformidade e estabilidade térmica na região onde estão inseridas a termorresistência de referência e a termorresistência em calibração.

O manual do fabricante apresenta os valores de uniformidade e estabilidade da temperatura do forno respectivamente como $\pm 0,03^\circ\text{C}$ e $\pm 0,018^\circ\text{C}$. Nenhuma informação sobre como esses valores são distribuídos é apresentada no manual. Desse modo foi adotada a distribuição uniforme para os valores de uniformidade e estabilidade.

6.2.1.4 Cabos e conexões

Qualquer junção entre distintos metais submetidos a diferentes temperaturas apresenta uma tensão entre seus terminais, podendo existir em conectores, terminais de ligação, junção de fios e bornes, entre outros. Assim, qualquer junção é uma fonte de tensão que depende da temperatura submetida e do tipo de material utilizado [Barp, 2000].

As tensões termoelétricas parasitas modificam o sinal representante da temperatura medida. Além dos conectores normais existentes no circuito de medição, a ligação de fios de platina da termorresistência com fios de cobre no circuito de medição podem interferir no resultado de medição, dependendo do circuito utilizado.

A norma EURAMET/cg – 11/ v.01 - *Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement*, apresenta uma estimativa do valor das tensões termoelétrica parasitas de $\pm 2\ \mu\text{V}$ para uma distribuição de probabilidade uniforme.

Uma estimativa da impedância provocada pelas tensões parasitas pode-se ser estimada através da razão entre a tensão parasita e a corrente de excitação. Em acordo com as informações do fabricante, o calibrador gera uma corrente de excitação de 0,25 mA para leitura de termorresistências e com uma tensão parasita estimada de $\pm 2\ \mu\text{V}$ resulta

em uma impedância parasita de 8 m Ω provocando um erro de aproximadamente 0,02 °C .

6.2.2 Resultados do processo de calibração

Com as fontes de incertezas determinadas para cada módulo da cadeia de medição definida para o processo de calibração proposto uma equação de medição que representa o processo de calibração foi estimada.

Para a realização da simulação foi proposta uma equação de medição para a determinação da tendência do termômetro digital. A equação 9 apresenta a equação de medição para a determinação da tendência instrumental no processo de calibração.

$$T = (\bar{I}_{SMC} + \delta res) - (\bar{I}_{SMP} + \delta calib + \delta for + \delta ter) \quad (9)$$

Onde;

T , tendência no ponto medido;

\bar{I}_{SMC} , indicação do sistema de medição em calibração;

\bar{I}_{SMP} , indicação do sistema de medição padrão.

δres , correção devido à resolução do sistema de medição em calibração.

δfor , correções devido ao forno (estabilidade e uniformidade).

$\delta calib$, correções devido ao calibrador (certificado, resolução e deriva temporal).

δter , correções devido ao Pt100 padrão (certificado, deriva temporal, tensões parasitas, auto-aquecimento e resistência de isolamento).

Em acordo com a equação 9, o sistema em calibração e o sistema padrão estão medindo a mesma temperatura em um forno de calibração. Para a avaliação da incerteza de medição foram consideradas as fontes de incerteza das indicações do sistema em calibração, das indicações do sistema padrão, dos efeitos de estabilidade e uniformidade do forno e do efeito de cabos e conexões.

O sistema de medição padrão é composto por um sensor termorresistência e um calibrador digital, compondo um medidor de temperatura. As incertezas do sensor e do calibrador foram consideradas na avaliação da incerteza.

Para a indicação do sistema em calibração foi considerada correção devido à resolução finita do termômetro uma fonte de incerteza. Para a indicação do sistema padrão foram consideradas as seguintes fontes de incerteza: os dados do certificado de calibração do termorresistência padrão, auto-aquecimento da termorresistência padrão, deriva temporal do termorresistência padrão, resistência de isolamento do termorresistência padrão, dados do certificado de calibração do calibrador digital padrão, deriva temporal do calibrador padrão, resolução do calibrador padrão e tensões parasitas devido ao efeito de conexões.

Os sistemas de medição utilizados no processo de calibração proposto e seus respectivos parâmetros foram cadastrados no ambiente de simulação. Uma cadeia de medição foi montada com os sistemas cadastrados.

A figura 25 apresenta o modelo de cadeia de medição cadastrado no ambiente de simulação e sua respectiva equação que representa a incerteza do processo de calibração. A figura 25 apresenta os resultados encontrados para a simulação do processo de calibração proposto.

Figura 25 – Modelo de cadeia de medição cadastrado

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi avaliada a variação dos valores do desvio padrão, média, limite inferior e superior do intervalo de abrangência. Para avaliação da variação dos resultados foram realizadas 5 simulações para cada valor de M e calculado a média e o desvio padrão conforme tabela 6. A figura 26 apresenta um gráfico com os resultados obtidos para diferentes valores de M .

Tabela 6 – Análise da variação de M nos resultados simulados

	$M=1000$		$M=10000$		$M=10^5$		$M=10^6$	
	Média	s	Média	s	Média	s	Média	S
M	-0,0056	0,0082	0,0004	0,0024	-0,0003	0,0011	0,000002	0,000267
DP	0,3437	0,0074	0,3416	0,0027	0,3421	0,0004	0,34214	0,000162
INF	-0,6444	0,0087	-0,6350	0,0063	-0,6387	0,0021	-0,63775	0,000405
SUP	0,6518	0,0141	0,6362	0,0086	0,6379	0,0009	0,63792	0,000291

Legenda:

M – média obtida no ambiente de simulação

DP – desvio padrão obtido no ambiente de simulação

s – desvio padrão calculado com os resultados

INF – limite inferior do intervalo de abrangência obtido no ambiente de simulação

SUP – limite superior do intervalo de abrangência obtido no ambiente de simulação

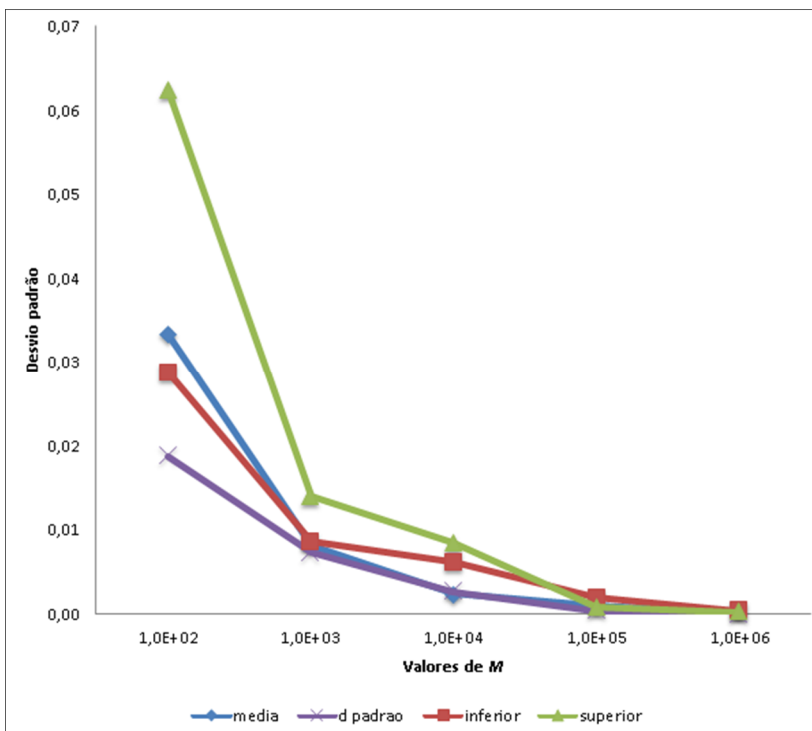


Figura 26 – Gráfico da variação da média, desvio padrão, limite superior e inferior do IC para diferentes valores de M

Em acordo com os resultados obtidos na análise do número de iterações M no item 6.1 e item 6.2.2 o número de iterações recomendado para realização de simulações é pelo menos 10^5 . A figura 27 apresenta os resultados obtidos com para o processo de calibração utilizado como estudo de caso.

Foi obtido um intervalo de abrangência de $[-0,67; +0,67]$ °C como resultado da simulação de Monte Carlo para o processo de calibração proposto. Pode-se dizer que a incerteza expandida associada à tendência é de no mínimo $\pm 0,67$ °C. Pode-se verificar que a distribuição de saída se aproxima da função densidade de probabilidade normal, conforme teorema central do limite.

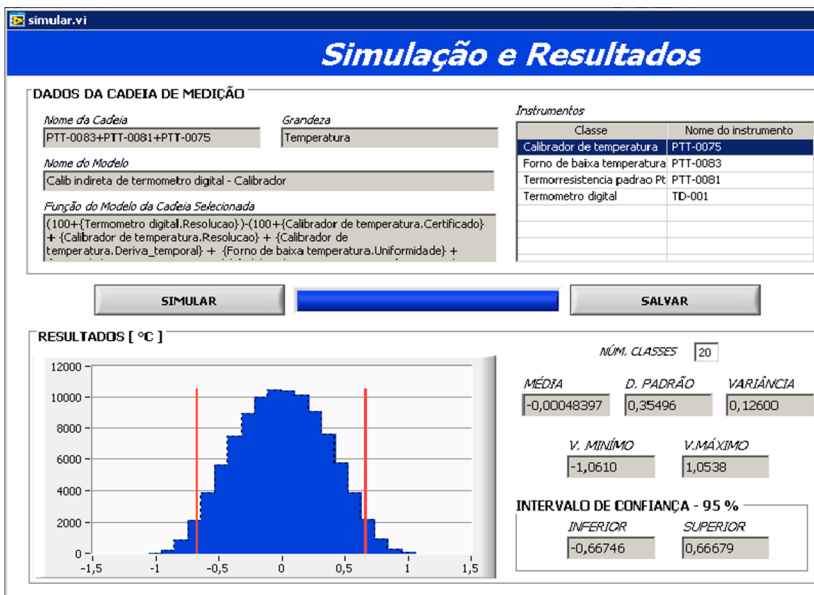


Figura 27 – Resultados obtidos para o processo de calibração proposto.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foi realizada uma avaliação pelo método do GUM para comparação dos resultados obtidos no ambiente de simulação. A figura 28 apresenta a planilha de incertezas em acordo com o método do ISO GUM adotado no laboratório que serviu como estudo de caso.

Fonte de incerteza	Estimativa	Incerteza padrão	Distribuição de probabilidade	Fator divisor	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza	Graus de liberdade
Incerteza referente resolução do termometro digital	0,5000	0,28868	Retangular	1,73	1	0,2887	inf
Incerteza referente a uniformidade do forno	0,0500	0,02887	Retangular	1,73	1	0,0289	inf
Incerteza referente a estabilidade do forno	0,0200	0,01155	Retangular	1,73	1	0,0115	inf
Incerteza referente a resolução do calibrador	0,0050	0,00289	Retangular	1,73	1	0,0029	inf
Incerteza referente a deriva temporal do calibrador	0,3000	0,17321	Retangular	1,73	1	0,1732	inf
Incerteza referente a calibração do calibrador	0,0300	0,01500	T-Student	2,00	1	0,0150	inf
Incerteza referente a tensões parasitas	0,0050	0,00289	Retangular	1,73	1	0,0029	inf
Incerteza referente a deriva da termorresistência padrão	0,0200	0,01155	Retangular	1,73	1	0,0115	inf
Incerteza referente a calibração da termorresistência padrão	0,1800	0,09000	T-Student	2,00	1	0,0900	inf
Incerteza referente a auto-aquecimento da termorresistência padrão	0,0016	0,00092	Retangular	1,73	1	0,0009	inf
Incerteza referente a resistencia de isolacao	0,0020	0,00115	Retangular	1,73	1	0,0012	inf
U combinada:						0,3504	
fator de abrangência (k):						2,00	
U expandida:						0,70	

Figura 28 – Planilha de incerteza em acordo com o GUM.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que os resultados obtidos pelo ambiente de simulação e pelo GUM apresentaram valores muito próximos. Os resultados obtidos comprovam a aplicabilidade do ambiente de simulação possibilitando a comparação de diferentes processos de calibração.

Portanto o presente trabalho gerou como resultado um ambiente de simulação para a avaliação da incerteza de medição em processos de calibração de sistemas de medição, através do método de Monte Carlo, que possibilita comparação entre processos de calibração contribuindo de forma significativa na seleção de um processo de calibração mais adequado as necessidades de um laboratório.

7 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um ambiente de simulação de incerteza de medição em processos de calibração de sistemas de medição através do método de simulação Monte Carlo.

Com base em uma equação de medição que represente o processo de calibração e nas informações das características metrológicas dos elementos que constituem o processo de calibração, como os padrões e dispositivos auxiliares, é possível estabelecer uma cadeia de medição possibilitando a geração de valores e a simulação da incerteza de medição associada ao resultado de calibração, obtendo um intervalo de abrangência que representa a incerteza expandida de medição associada ao resultado da calibração com um nível de confiança de 95%.

O sistema foi desenvolvido no ambiente de programação gráfica LABVIEW e o banco de dados relacional com MySQL. O método utilizado para a simulação da incerteza do processo de calibração e avaliação do intervalo de abrangência e geração de resultado foi baseado na simulação de Monte Carlo devido a facilidade de implementação com ferramentas computacionais.

Um processo de calibração na área de temperatura foi proposto para avaliar a aplicabilidade do ambiente de simulação. A calibração de um termômetro digital por comparação com uma termorresistência padrão foi utilizado para essa avaliação. Sistemas de medição padrões e dispositivos auxiliares utilizados pelo laboratório de calibração ACC PR foram utilizados como dados reais para tal avaliação.

7.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS

Os resultados obtidos na simulação da incerteza de medição com o processo de calibração proposto apresentaram o resultado esperado, em acordo com os valores dos parâmetros e equação proposta. Os valores apresentados como resultados da simulação estão em acordo com os valores praticados pelo laboratório.

O método de simulação de Monte Carlo adotado no ambiente de simulação apresentou-se como adequado para a determinação da incerteza de medição do processo de calibração por não apresentar limitações do modelo de medição, como as do método do GUM.

7.2 ADEQUAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

O ambiente de programação LABVIEW e o MySQL utilizados para o desenvolvimento do ambiente de simulação e do banco de dados, apresentaram-se como eficazes. A existência de blocos e ferramentas prontas para a geração de distribuições e funções relacionadas ao gerenciamento e utilização do banco de dados facilitou a programação e desenvolvimento do ambiente, elevando sua robustez e minimizando a possibilidade de erros.

As ferramentas MySQL para criação, gerenciamento e conexão com o banco de dados possuem fácil integração com a linguagem do LABVIEW.

7.3 POSSIBILIDADE DE TRABALHOS FUTUROS

Foram identificadas as seguintes oportunidades relativas ao desenvolvimento de trabalhos futuros:

- desenvolvimento do ambiente de simulação possibilitando a avaliação da incerteza de medição na realização de ensaios;
- desenvolvimento do ambiente de simulação possibilitando a avaliação de incerteza de medição de grandezas elétricas e mensurados variáveis;
- integração de novas funcionalidades ao ambiente que possibilite, por exemplo, a comparação e seleção automática entre processos de calibração de uma mesma grandeza;
- utilização de uma linguagem de programação independente do sistema operacional, para que o ambiente de simulação rode em outros Linux

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibração. Rio de Janeiro, 2005. 31 p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001**: Sistema de Gestão da Qualidade: Requisitos. Rio de Janeiro, 2008. 28 p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9000**: Sistema de Gestão da Qualidade: Fundamentos e vocabulários. Rio de Janeiro, 2005. 35 p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10012**: Sistema de Gestão de Medição: Requisitos para os processos de medição e equipamento de medição. Rio de Janeiro, 2004. 20 p.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10012 -1**: Requisitos de garantia da qualidade para equipamento de medição: Parte 1: Sistema de comprovação metrológica para equipamento de medição. Rio de Janeiro, 1993. 14 p.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10012 - 2**: Garantia da qualidade para equipamentos de medição: Parte 2: Diretrizes para controle de processos de medição. Rio de Janeiro, 1999.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14670**: Indicador de temperatura para termopar – Calibração por comparação utilizando gerador de sinal. Rio de Janeiro, 2001. 7 p.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13772**: Termorresistência – Calibração por comparação com termorresistência de referência. Rio de Janeiro, 1997. 4 p
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13773**: Termorresistência Industrial de Platina – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997. 11 p.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12550**: Termometria – Terminologia. Rio de Janeiro, 1998. 9 p
- [11] ALBERTAZZI G. JR, Armando; SOUZA, André R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1. Ed. Florianópolis: Manole, 2008. 407 p.
- [12] BARP, Alexandre Moraes. **Metodologia de avaliação e de gerenciamento da incerteza de sistemas de medição de temperatura**.

2000. Dissertação (Mestrado em Metrologia). Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

[13] BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. **JCGM 104: Evaluation of measurement data: An introduction to the Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents.** Paris, 2009. 26 p.

[14] BRAUDAWAY, D. W. *Uncertainty Specification for Data Acquisition Devices (DAQ)*, In: IMTC – INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 20., 2003, California. **Proceedings**...USA: IEEE, 2003. p. 946-950.

[15] CALDARA, S.; NUCCIO, S.; SPATARO, C. *Measurement Uncertainty Estimation of a Virtual Instrument*. In: IMTC – INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 17, 2000, Baltimore. **Proceedings**...USA: IEEE, 2000. p. 1506-1511.

[16] COUTO, P. R. G.; OLIVEIRA, J. S.; CINELLI L. R. Algumas Considerações sobre a Metodologia de Cálculo da Estimativa de Incerteza de Medição Citadas no ISO GUM 95. **INMETRO**, Rio de Janeiro, 30 agosto 2002. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/producao intelectual/>>. Acesso em: 24 agosto 2009.

[17] COUTO, P. R. G.; MONTEIRO, L. C. A Função de um Laboratório de Metrologia de Acordo com o Contexto da Globalização. **INMETRO**, Rio de Janeiro, 17 dezembro 2000. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/producao intelectual/>>. Acesso em: 24 agosto 2009.

[18] DARRIGO, Silvia Regina. **Desenvolvimento de modelos do comportamento metrológico estático de instrumentos de medição.** 2001. 129 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

[19] DONATELLI, Gustavo Daniel; KONRATH, Andréa Cristina. **Considerações sobre a Aplicação da Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição.** Florianópolis, 19 p. Trabalho não publicado.

[20] DONATELLI G. D. KONRATH A. C. Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 13, n. 25/26, p. 5-15, 2005.

[21] DONATELLI, G. D. DAVIS, J. *The Cost of the Conformity with Specifications*. In: INTERNATIONAL METROLOGY CONGRESS, 9.,

- 1999, Bordeaux. **Proceedings...** France: INTERNATIONAL METROLOGY CONGRESS, 1999. 4 p.
- [22] EUROPEAN ASSOCIATION OF NATIONAL METROLOGY INSTITUTE. **CG-11/v.01: Guidelines on the calibration of temperature indicators and simulators by electrical simulation and measurement.** Braunschweig, 2007. 21 p.
- [23] EUROPEAN CO-OPERATION ACCREDITATION. **EA - 04/02: Expressão da Incerteza de Medição na Calibração.** Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02. Rio de Janeiro, 1999. 35 p.
- [24] EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS OF MEASUREMENT, TESTING AND ANALYTICAL LABORATORIES. **Technical Report N° 1: Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation.** Bruxelas, 2007. 62 p.
- [25] ECIL TEMPERATURA INDUSTRIAL. **Manual de Instruções: Forno para calibração modelo Ecil BT.** Rev. 00/04. Piedade, 2004. 11 p. Disponível em <www.ecil.com.br/site/home_ti> . Acesso em: 10 fevereiro 2010.
- [26] ECIL TEMPERATURA INDUSTRIAL. **Manual de Instruções: Calibrador portátil Cappel Plus.** Rev. 00/04. Piedade, 2004. 43 p. Disponível em <www.ecil.com.br/site/home_ti>. Acesso em: 10 fevereiro 2010.
- [27] FLESCH, Carlos Alberto. **Estruturação de um sistema de simulação de instrumentos de medição.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001
- [28] FLUKE CORPORATION. **Technical Data – Secondary PRT with calibration options.** Disponível em: <www.fluke.com>. Acesso em: 10 abril de 2010
- [29] GALLAS, Márcia Russman. **Incerteza de Medição.** Porto Alegre, 10p. Trabalho não publicado
- [30] GAVILON, Igor. **Desenvolvimento de um Sistema para Avaliação de Incertezas em Bancadas de Ensaio de Desempenho de Compressores de Refrigeração.** 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [31] HEUSER, Carlos Alberto. **Projeto de Banco de Dados.** 4. Ed. Porto Alegre: Instituto de Informática da UFRGS, 1998. 206 p.
- [32] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Guia para a**

expressão da Incerteza de Medição: Avaliação de Dados de Medição (1ª Edição Brasileira da 1ª Edição do BIPM de 2008). Rio de Janeiro, 2012. 141 p.

[33] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário Internacional de Metrologia:** Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (1ª Edição Luso - Brasileira). Rio de Janeiro, 2012. 95 p.

[34] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **NIT-DICLA-021 REV. 08:** Expressão da Incerteza de Medição por Laboratórios de Calibração. Rio de Janeiro, 2012. 27 p.

[35] JORNADA, D. H.; JORNADA, F. H. Cálculo de Incerteza da Medição: Estudo Comparativo entre Métodos do GUM, de Monte Carlo e Integração Numérica. In: CONGRESSO DA QUALIDADE EM METROLOGIA. 7., 2007, São Paulo. **Anais...**São Paulo: EQUALAB, 2007. 7 p.

[36] JORNADA, D. H.; CATEN, C. S. Uma Revisão sobre Abordagens e Métodos de Cálculo de Incerteza. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE METROLOGIA, 5., 2007, Curitiba. **Anais...**Curitiba: METROSUL, 2007. 6 p.

[37] JORNADA, D. H.; PIZZOLATO, M. Uso de Planilhas Eletrônicas para Implementação do Método de Monte Carlo para Estimativa da Incerteza de Medição. In: CONGRESSO DA QUALIDADE EM METROLOGIA. 5., 2005, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ENQUALAB, 2005. 6 p.

[38] KESSEL, Wolfgang. *Measurement uncertainty according to ISO/BIPM-GUM*. *Thermochimica Acta*. Germany, 27 June 2001. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com> >. Acesso em: 10 de maio 2010.

[39] KONRATH, A. C. DONATELLI, G. D. PIEKAR D. H. *The Application of Monte Carlo Simulaion to Evaluate the Uncertainty of Control Chart Performance Indices*. In: **IMEKO WORLD CONGRESS**, 18., Rio de Janeiro. **Proceedings...**Rio de Janeiro: International Measurement Confederation, 2006.

[40] KORCZYNSKI, Marian Jerzy. HETMAN, Andrzej. *A Calculation of Uncertainties in Virtual Instrument*. In: **IMTC - INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE**, 22., 2005, Ottawa. **Proceedings...**USA: IEEE, 2005. p. 1697 – 1701.

- [41] KUNZMAN, H., et al. *Productive Metrology: Adding Value to Manufacture. Manufacturing Technology*. **Manufacturing Technology**, Germany, 14 junho 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 de maio 2010.
- [42] LANDGRAF, W. R.; STEMPNIAK, C. R. Simulação de Monte Carlo e Ferramentas para a avaliação da incerteza de medição. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE METROLOGIA. 4., 2004, Foz do Iguaçu. **Anais...**Paraná: METROSUL IV, 2005. 9 p.
- [43] MOSCATI, G.; MEZZALIRA, L. G.; SANTOS, F. D. Incerteza de Medição pelo Método de Monte Carlo no Contexto do “Suplemento 1” do GUM . In: ENCONTRO PARA A QUALIDADE DE LABORATÓRIOS. 4., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ENQUALAB , 2004. 4 p.
- [44] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW Development Guidelines**. Disponível em: <www.ni.com/pdf/manuals/>. Acesso em: 10 agosto de 2009.
- [45] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW QuickStart Guide**. 1999. Disponível em: <www.ni.com/pdf/manuals/>. Acesso em: 10 agosto de 2009.
- [46] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW User Manual**. 2003. Disponível em: <www.ni.com/pdf/manuals/>. Acesso em: 10 agosto de 2009.
- [47] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Database Connectivity. Toolset User Manual**. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2009.
- [48] ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE METROLOGIA LEGAL. **G1-101: Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”- Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method**. Paris, 2007. 94 p.
- [49] OLIVEIRA, J. C. V.; SANTOS J. A. N. Confiabilidade e Exatidão de Processos de Calibração: uma proposta de metodologia. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE METROLOGIA. 4., 2004, Fóz do Iguaçu. **Anais...**Paraná: METROSUL IV, 2004. 5 p.
- [50] OLIVEIRA, Antônio Carlos Xavier. **Modelagem de características dinâmicas de instrumentos de medição**. 2001. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

- [51] PAULA, André Capelão. **Desenvolvimento de experimentos simulados para treinamento em metrologia**. 2003. Dissertação (Mestrado em Metrologia). Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [52] PIEKAR, D. H.; DONATELLI, G. D.; SCHNEIDER, C. A. *Setting the Process Aim: The Effect of Measurement Uncertainty*. In: IMEKO WORLD CONGRESS, 17., 2003, Dubrovnik. **Proceddings...**Dubrovnik: International Measurement Confederation, 2003. 6 p.
- [53] PINTO, L. F. M. Metrologia Formal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 5., 2009, São Paulo. **Anais...**São Paulo: V CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 2009. 6 p.
- [54] PIZZOLATO, M.; JORNADA, D. H.; CATEN C. S. Garantia da Qualidade de Equipamentos e Padrões de Medição. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 11., 2004, Bauru. **Anais...**São Paulo: XI SIMPEP, 2004. 8 p.
- [55] PIZZOLATO, M.; JORNADA, D. H.; CATEN, C. S. *Reference Documents on Measurement Uncertainty Derived From the GUM: A Critical Analysis*. In: NCSL INTERNATIONAL WORKSHOP AND SYMPOSIUM, 12., 2009, San Antonio. **Anais...**Texas: NCSL INTERNATIONAL, 2009. 13 p.
- [56] SARAIVA, Celso P.; VENTURINI, Narci Edson. Simplificando o cálculo da incerteza de medição em ensaios e calibrações rotineiras. In: ENCONTRO PARA A QUALIDADE DE LABORATÓRIOS, 4., 2003, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ENQUALAB, 2003. 4 p.
- [57] SERENO, H. R. S.; SHEREMETIEFF Jr. A. Guia para Elaboração de um Plano de Manutenção da Confiabilidade Metrológica de Instrumentos de Medição. **INMETRO**, Rio de Janeiro, 03 setembro 2009. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/producao intelectual/>>. Acesso em: 24 agosto 2009.
- [58] SOUZA, J. A.; RIBEIRO A. S. Vantagens da Utilização do Método de Monte Carlo na Avaliação das Incertezas de Medição. In: ENCONTRO NACIONAL DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE METROLOGIA, 2., 2006, Lisboa. **Anais...**Lisboa: CONFMET, 2006. 4 p.
- [59] SOMER, K. D.; SIEBERT, B. R. L. *Systematic approach to the modeling of measurements for uncertainty evaluation*. In: *JOURNAL OF PHYSICS:CONFERENCE SERIES*, 13., 2006. **Proceedings...**UK: Metrologia, Institute of Physics, 2006. p. S200-S210.

- [60] SPITALERI, Charles. *Using Databases with LabVIEW*. Melville: LABVIEW USER GROUP MEETING, 2007. 26 slides, color. Acompanha texto.
- [61] STEMPNIAK, C. R.; LANDGRAF, W. R.; PAULA, L. C. Reduzindo a Incerteza de Medição com Ajuda do Software. In: CONGRESSO DA QUALIDADE EM METROLOGIA. 5., 2005, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ENQUALAB, 2005. 5 p.
- [62] SUN MICROSYSTEMS. *MySQL 5.1 Reference Manual*. Disponível em: < <http://dev.mysql.com/doc/#refman>>. Acesso em: 10 de outubro de 2009.
- [63] SUN MICROSYSTEMS. *MySQL Workbench*. Disponível em: < <http://dev.mysql.com/doc/#refman>>. Acesso em: 10 de outubro de 2009.
- [64] SUN MICROSYSTEMS. *MySQL Administrator*. Disponível em: < <http://dev.mysql.com/doc/#refman>>. Acesso em: 10 de agosto de 2009.
- [65] SUN MICROSYSTEMS. *MySQL Connector/ODBC*. Disponível em <<http://downloads.mysql.com/docs>> . Acesso em: 10 de agosto de 2009.
- [66] TRAVIS, J. D. *LabVIEW for Everyone*, 2 ed. Saddle River: Prentice Hall, 2002. 589 p.
- [67] VAN PUTTEN, A. F. P. *Electronic Measurement System: Theory and Practice*, 2. ed. London: Institute of Physics, 1996. 446 p.
- [68] VISOMES COMERCIAL METROLÓGICA LTDA. **Catálogo Banho Ultra termostático para Calibração Mod. V50**. São Paulo, 2010. 1p. Disponível em: <http://www.visomes.com.br/arquivo_inf_tec/>. Acesso em: 10 de outubro de 2009.
- [69] WILLINK, R. *Principle of probability and statistics for metrology*. In: *JOURNAL OF PHYSICS:CONFERENCE SERIES*, 13., 2006. *Proceedings...*UK: Metrologia, Institute of Physics, 2006. p. S211-S219.